

**DEGRADASI FOTOELEKTROKATALITIK *REMAZOL YELLOW FG*
MENGUNAKAN SEMIKONDUKTOR LAPIS TIPIS GRAFIT/TiO₂/Cu
DAN GRAFIT/KOMPOSIT TiO₂-SiO₂/Cu**



**Disusun Oleh :
ROCHMI INDRI APRIYANI
M 0302008**

SKRIPSI

Ditulis Dan Diajukan Untuk Memenuhi Sebagian
Persyaratan Mendapatkan Gelar Sarjana Sains Kimia

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS SEBELAS MARET
SURAKARTA**

2007

PENGESAHAN

Skripsi ini dibimbing oleh :

Pembimbing I

Pembimbing II

Fitria Rahmawati, MSi

Drs. Sentot Budi Rahardjo, Ph.D

NIP. 132 258 066

NIP. 131 570 162

Dipertahankan di depan Tim Penguji Skripsi pada :

Hari : Kamis

Tanggal : 12 April 2007

Anggota Tim Penguji :

1. Drs. Mudjijono, PhD.

NIP. 131 570 167

1.....

2. Sri Hastuti, MSi.

NIP. 132 162 562

2.....

Disahkan Oleh

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Dekan

Ketua jurusan Kimia

Drs. Marsusi, MS.

Drs. Sentot Budi Rahardjo, Ph.D

NIP. 130 906 776

NIP. 131 570 162

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “**Degradasi Fotoelektrokatalitik *Remazol Yellow FG* Menggunakan Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/TiO₂/Cu dan Grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu**” adalah benar-benar hasil penelitian sendiri dan tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat kerja atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Surakarta, April 2007

ROCHMI INDRI APRIYANI

ABSTRAK

Rochmi Indri Apriyani. 2007. DEGRADASI FOTOELEKTROKATALITIK REMAZOL YELLOW FG MENGGUNAKAN SEMIKONDUKTOR LAPIS TIPIS GRAFIT/TiO₂/Cu DAN GRAFIT/KOMPOSIT TiO₂-SiO₂/Cu. Skripsi. Jurusan Kimia. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Sebelas Maret.

Penelitian mengenai aplikasi material lapis tipis grafit/TiO₂, grafit/komposit TiO₂-SiO₂, grafit/TiO₂/Cu dan grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu untuk mendegradasi zat warna *Remazol Yellow FG* telah dilakukan untuk mempelajari efisiensi relatif dari material tersebut pada proses degradasi. Metode degradasi yang digunakan adalah fotodegradasi, elektrodegradasi dan fotoelektrodegradasi. Komposisi material semikonduktor yang paling efisien digunakan untuk mendegradasi limbah zat warna *Remazol Yellow FG*.

Dalam penelitian ini, 20 ppm larutan *Remazol Yellow FG* telah didegradasi selama 240 menit menggunakan lampu UV dan iluminasi sinar matahari, dan dengan pemberian potensial listrik 0,5 A; 12 V dari sebuah *power supply*. Efisiensi relatif penggunaan material semikonduktor sebagai agen pengkatalitik dapat disimpulkan dari pengukuran absorbansi larutan menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Perubahan gugus – gugus fungsi sebagai hasil dari proses degradasi dapat diamati menggunakan spektroskopi FT-IR.

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa fotoelektrodegradasi sinar UV menggunakan semikonduktor grafit/TiO₂/Cu efisiensi relatif pada 60 menit pertama (η_{60}) 77,47 % dibandingkan fotodegradasi dan 11,52 % lebih efisien (η_{60}) dibandingkan elektrodegradasi. Semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂/Cu 72,57 % lebih efisien (η_{60}) dibandingkan grafit/TiO₂ dan semikonduktor grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu 33,25 % lebih efisien (η_{60}) dibandingkan menggunakan grafit/komposit TiO₂-SiO₂. Kesimpulan lain dari penelitian ini adalah bahwa grafit/TiO₂/Cu 13,91 % lebih efisien (η_{60}) dibandingkan grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu. Spektra IR setelah proses degradasi menunjukkan penghilangan gugus $\nu_{as}CH_2$ dan N=N serta pergeseran puncak – puncak aromatik C=C, OH melebar, N-H dan garam sulfon. Semua puncak *Remazol Yellow FG* masih teramati, hal itu karena zat warna *Remazol Yellow FG* masih tersisa pada larutan hasil akhir degradasi, meskipun warna larutan telah jernih.

Kata kunci : Degradasi fotoelektrokatalitik, *Remazol Yellow FG*, Grafit/TiO₂/Cu, Grafit/Komposit TiO₂-SiO₂/Cu

ABSTRACT

Rochmi Indri Apriyani. 2007. PHOTOELECTROCATALYTIC DEGRADATION OF REMAZOL YELLOW FG WITH THIN FILM GRAPHITE/TiO₂/Cu AND GRAPHITE/COMPOSIT TiO₂-SiO₂/Cu SEMICONDUCTOR. Thesis. Departement of Chemistry. Mathematic and Science Faculty. Sebelas Maret University

The research about thin film of grafit/TiO₂, grafit/composite TiO₂-SiO₂, grafit/TiO₂/Cu and grafit/composite TiO₂-SiO₂/Cu application for *Remazol Yellow FG* degradation had been conducted to study the relative efficiency of these materials for degradation process. The degradation methods are photodegradation, electrodegradation and photoelectrodegradation. The most efficient semiconductor material had been used to degrade *Remazol yellow FG* waste water.

In this research, 20 ppm *Remazol Yellow FG* had been degraded for 240 minutes under UV light and sun light illumination, and under applied potential of 0,5 A; 12V from a *power supply*. The relative efficiency of semiconductor material as catalytic agent had been concluded from the measurement of solution absorbance using UV-Vis spectrofotometer. The changes of functional groups resulted by degradation had been observed by FT-IR spectroscopy.

Based on the result of the research, it can be concluded that photoelectrodegradation under UV light using grafit/TiO₂/Cu have relative efficiency at the first 60 minutes (η_{60}) 77,47 % more efficient than photodegradation and 11,52 % more efficient (η_{60}) than electrodegradation. Thin film of grafit/TiO₂/Cu is 72,57 % more efficient (η_{60}) than grafit/TiO₂ and grafit/composite TiO₂-SiO₂/Cu is 33,25 % more efficient (η_{60}) than grafit/composite TiO₂-SiO₂. Futher conclusions of this research is that grafit/TiO₂/Cu is 13,91 % more efficient (η_{60}) than grafit/composite TiO₂-SiO₂/Cu. FT-IR spectrum after degradation process shows the $\nu_{as}CH_2$ and N=N elimination also the shift of C=C aromatic, wide of OH, N-H and sulfon salt functional groups. The whole peaks of *Remazol Yellow FG* is still observed, this is caused by remaining of *Remazol Yellow FG* in the degraded solution, although the colour is clear.

Key word : Photoelectrocatalytic degradation, *Remazol Yellow FG*, Grafit/TiO₂/Cu, Grafit/composit TiO₂-SiO₂/Cu

MOTTO

**Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan. Maka apabila kamu telah selesai (dari sesuatu urusan), kerjakanlah dengan sungguh-sungguh (urusan) yang lain
(Alam Nasyrah : 6 – 7)**

Tak ada yang terantuk gunung. Kerikil kecillah yang menyebabkan kau terjatuh. Lewatilah semua kerikil di jalan yang kau lalui dan kau akan menemukan bahwa kau telah melintasi gunung itu

(Petuah Bijak)

Manakala sebuah realita tidak sama dengan apa yang diinginkan, hanya satu yang pantas dilakukan, bukan tangis yang mengiba, bukan tawa yang memekakkan telinga, bukan kesedihan yang meratap ataupun kekecewaan yang buta “

BERSYUKUR“

(Petuah Bijak)

PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, atas berkah, rahmat dan lindungan **ALLAH SWT** yang kudapatkan beserta Rasul-Nya **Nabi Muhammad SAW** panutanku akhirnya tercipta karya ini.

Karya ini kupersembahkan untuk :

Ibu, Bapak, yang senantiasa mendo'akan, mencurahkan segala kasih sayang tak berujung dan segala perjuangan untuk kami.

Mb' Aan, Dek' Dendik, kakak dan adikku, pemberi dukungan dan segala yang berwarna dalam hidupku.

"Masku", aku yakin semua akan indah tepat pada waktunya.
Semoga mimpi kita nyata adanya.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, atas segala limpahan rahmat, hidayah, inayah dan ridho-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini, yang berjudul **Degradasi Fotoelektrokatalitik *Remazol Yellow FG* Menggunakan Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/TiO₂/Cu dan Grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu** dengan baik. Skripsi ini diajukan guna memperoleh Gelar Sarjana Sains dari Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.

Skripsi ini tidak akan selesai tanpa adanya bantuan dari banyak pihak, untuk itu maka penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Drs. Marsusi, M.S., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas sebelas Maret.
2. Bapak Sentot Budi Rahardjo, Ph.D., selaku Ketua Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sebelas Maret dan Pembimbing II atas bimbingan, arahan, dan penjelasan.
3. Ibu Fitria Rahmawati, M.Si., selaku Pembimbing I yang telah banyak memberikan bimbingan, arahan, dan ilmu yang telah diberikan.
4. Bapak Achmad Ainurofiq, MS., selaku Pembimbing Akademis, atas arahan dan bimbingannya.
5. Bapak Drs. Mudjijono, Ph.D, selaku Ketua Laboratorium Pusat MIPA, Universitas Sebelas Maret, beserta teknisi atas bantuannya.
6. Bapak Dr. rer. nat. Fajar Rakhman Wibowo, Msi, selaku Ketua Sub. Lab. Kimia, Laboratorium Pusat MIPA, Universitas Sebelas Maret, beserta teknisi atas bantuannya.
7. Ibu Desi Suci Handayani, M.Si., selaku Ketua Laboratorium Kimia F MIPA, Universitas Sebelas Maret beserta Mas Anang & Mbak Nanik atas segala bantuannya selama ini.

8. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen di Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sebelas Maret, atas ilmu yang telah diberikan.
9. Teman – teman angkatan 2002, angkatan 2001, angkatan 2003, angkatan 2004, angkatan 2005, dan angkatan 2006. Makasih atas bantuanya.
10. Semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu sejak awal penyusunan proposal hingga selesainya skripsi ini.

Semoga Allah SWT membalas bantuan dan pengorbanan yang telah diberikan dengan balasan yang baik.

Penulis sadar bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Harapan penulis semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan kita semua. Amieen.

Surakarta, April 2007

Rochmi Indri Apriyani

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL.....	
HALAMAN PENGESAHAN.....	
HALAMAN PERNYATAAN	
HALAMAN ABSTRAK.....	
HALAMAN ABSTRACT.....	
HALAMAN MOTTO.....	
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	
KATA PENGANTAR.....	
DAFTAR ISI.....	
DAFTAR TABEL.....	
DAFTAR GAMBAR.....	
DAFTAR LAMPIRAN.....	
DAFTAR TABEL LAMPIRAN.....	
DAFTAR GAMBAR LAMPIRAN.....	
BAB I PENDAHULUAN.....	
A. Latar Belakang Masalah.....	
B. Perumusan Masalah.....	
1. Identifikasi Masalah.....	
2. Batasan Masalah.....	
3. Rumusan Masalah.....	
C. Tujuan Penelitian.....	
D. Manfaat Penelitian.....	
BAB II LANDASAN TEORI.....	
A. Tinjauan Pustaka.....	
1. Degradasi Fotoelektrokatalitik	

(Fotoelektrodegradasi)	
2. Zat Warna.....	
3. Lapis Tipis TiO ₂ dan Modifikasinya sebagai Semikonduktor Fotokatalis.....	
a.. Semikonduktor Lapis Tipis TiO ₂	
b. Semikonduktor Lapis Tipis Komposit TiO ₂ – SiO ₂	
c. Semikonduktor Lapis Tipis TiO ₂ dan Komposit SiO ₂ -TiO ₂ Termodifikasi Cu.....	
4. Analisis.....	
a. Difraksi Sinar – X	
b. Spektra UV-Vis.....	
c. Spektroskopi Infra Merah (IR).....	
B. Kerangka Pemikiran.....	
C. Hipotesis.....	
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	
A. Metode Penelitian.....	
B. Tempat dan Waktu Penelitian.....	
C. Alat dan Bahan.....	
1. Alat.....	
2. Bahan.....	
D. Prosedur Penelitian.....	
1. Sintesis Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/TiO ₂ dan Semikonduktor Grafit/TiO ₂ -SiO ₂	
a. Sintesis Semikonduktor Lapis Tipis Grafit /TiO ₂	
b. Sintesis semikonduktor lapis tipis grafit/TiO ₂ -SiO ₂	
2. <i>Metal Surface Modification</i>	
3. Aplikasi Material Semikonduktor Grafit/TiO ₂ , Grafit/TiO ₂ /Cu, Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ dan Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu	

Hasil Sintesis Digunakan untuk Degradasi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i>	
a. Penentuan Panjang Gelombang Maksimum Larutan <i>Remazol Yellow FG</i>	
b. Pembuatan Kurva Standar <i>Remazol Yellow FG</i>	
c. Absorpsi Material pada Larutan <i>Remazol Yellow FG</i>	
d. Fotodegradasi Material pada Larutan <i>Remazol Yellow FG</i> ...	
e. Elektrodegradasi Material pada Larutan <i>Remazol Yellow FG</i>	
f. Fotoelektrodegradasi Material pada Larutan <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Lampu UV.....	
g. Fotoelektrodegradasi Material pada Larutan <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Sinar Matahari.....	
h. Pengukuran Intensitas Sinar Matahari.....	
i. Fotoelektrodegradasi Sempurna Zat Warna dan Limbah Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Oleh Semikonduktor Grafit/TiO ₂ /Cu	
j. Penentuan Perubahan Gugus Fungsi Hasil Degradasi dengan Semikonduktor Grafit/TiO ₂ /Cu	
E. Teknik Pengumpulan Data.....	
1. Pengumpulan Data.....	
2. Analisis Data.....	
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	
A. Sintesis Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/TiO ₂ , Grafit/TiO ₂ /Cu, Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ dan Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu.....	
B. Degradasi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i>	
C. Degradasi Fotoelektrokatalisis Limbah Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i>	
D. Penentuan Gugus – Gugus Fungsi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i>	

dengan FT-IR.....	
E. Pola Difraksi Hasil <i>Recycle</i> Grafit/TiO ₂ /Cu, dan Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu.....	
BAB V PENUTUP.....	
A. Kesimpulan.....	
B. Saran.....	
DAFTAR PUSTAKA.....	
LAMPIRAN-LAMPIRAN.....	

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 1.	Harga Absorpsi Infra Merah Beberapa Gugus Fungsi (Silverstein, D.F, P.W. Atkins, T.C. Morill, 1986).....
Tabel 2.	Perbandingan Puncak – Puncak Difraksi Hasil Sintesis dengan Handayani (2006) dan Wibowo (2006).....
Tabel 3.	Pengukuran Intensitas Sinar Matahari.....
Tabel 4.	Puncak – Puncak Spektra IR Sebelum dan Sesudah Degradasi.....

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Skema Fotoeksitasi yang Diikuti oleh Deeksitasi pada Permukaan Semikonduktor (Linsebigler, A.L., G. Lu Dan J.T. Yates,1995).....
Gambar 2. Struktur Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> (Rasjid,1976).....
Gambar 3. Gugus-Gugus Kromofor pada Zat Warna (Atmaji dkk, 1999).....
Gambar 4. Mekanisme Perpindahan Elektron karena Pengaruh Cahaya pada TiO ₂ (Hoffman <i>et al</i> ,1995).....
Gambar 5. Persen IPCE dari Semikonduktor Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ dengan Variasi Temperatur Kalsinasi (Nugraheni, 2006).....
Gambar 6. Morfologi Komposit TiO ₂ -SiO ₂ yang Ditempel pada Grafit dengan (A) 5000x dan (B) 10000x (insert) (Nugraheni, 2006)
Gambar 7. Proses Fotoeksitasi Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ (Eg _{TiO₂-SiO₂} = 3,47 eV (Nugraheni, 2006), Eg _{TiO₂} = 3,2 eV (Linsebigler, <i>et al.</i> , 1995)).....
Gambar 8. Mekanisme Migrasi Elektron pada Permukaan Semikonduktor Termodifikasi Logam (Linsebigler, <i>et al.</i> ,1995).....
Gambar 9. Hubungan %IPCE Versus Panjang Gelombang (nm) (a.) Grafit/TiO ₂ /Cu (Handayani, 2006) dan (b.) Grafit/ komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu (Wibowo, 2006)
Gambar 10. Morfologi (a.) Grafit/TiO ₂ /Cu Arus Elektrodeposisi 0,030 A dengan Perbesaran 5000x dan (b.) Grafit/ komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu Arus Deposisi 0,014 A dengan Perbesaran 5000x.....
Gambar 11. Sudut Difraksi Sinar X (West, 1984).....
Gambar 12. Desain Sel Sintesis Grafit/TiO ₂ dengan Metode <i>Chemical Bath Deposition</i> (Rahmawati dkk, 2006).....
Gambar 13. Tahapan Proses <i>Dip Coating</i> (Schmidt dan Mennig, 2000).....
Gambar 14. Setting Alat Elektrodeposisi (Handayani, 2006; Wibowo, 2006).....
Gambar 15. Setting Alat Fotodegradasi.....

Gambar 16.	Setting Alat Elektrodegradasi.....
Gambar 17.	Pola difraksi (a.) Grafit/TiO ₂ /Cu hasil sintesis, (b.) Pola difraksi Grafit/TiO ₂ /Cu (Handayani, 2006).....
Gambar 18.	Pola Difraksi (a.) Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu Hasil Sintesis, (b.) Pola difraksi Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu (Wibowo, 2006).....
Gambar 19.	Kurva Penentuan Panjang Gelombang Maksimum.....
Gambar 20.	Grafik Penurunan Konsentrasi <i>Remazol Yellow FG</i> Tanpa Arus dan Tanpa Sinar (Absorpsi) oleh Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/TiO ₂ , Grafit/TiO ₂ /Cu, Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ , maupun Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu.....
Gambar 21.	Grafik Fotodegradasi <i>Remazol Yellow FG</i> oleh Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/TiO ₂ , Grafit/TiO ₂ /Cu, Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ , maupun Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu.....
Gambar 22.	Gambar Setting Alat Elektrodegradasi.....
Gambar 23.	Grafik Elektrodegradasi <i>Remazol Yellow FG</i> oleh Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/TiO ₂ , Grafit/TiO ₂ /Cu, Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ , maupun Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu.....
Gambar 24.	Gambar Setting Alat Fotoelektrodegradasi.....
Gambar 25.	Grafik Fotoelektrodegradasi <i>Remazol Yellow FG</i> dengan Lampu UV.....
Gambar 26.	Grafik Fotoelektrodegradasi <i>Remazol Yellow FG</i> dengan Sinar Matahari.....
Gambar 27.	Karakteristik Degradasi Material Semikonduktor Grafit/TiO ₂ /Cu...
Gambar 28.	Karakteristik Degradasi Material Semikonduktor Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu.....
Gambar 29.	Perbandingan Fotoelektrodegradasi dengan Material Semikonduktor Grafit/TiO ₂ /Cu dan Grafit/Komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu yang Memakai Sumber Sinar Lampu UV dan Sinar Matahari.....
Gambar 30.	Foto Larutan Degradasi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> dengan Lampu UV.....

- Gambar 31. Foto Larutan Degradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Sinar Matahari.....
- Gambar 32. Fotoelektrodegradasi Limbah dan Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Semikonduktor Grafit/TiO₂/Cu dengan Sumber Sinar UV dan Matahari.....
- Gambar 33. Foto Larutan Degradasi Limbah Zat Warna *Remazol Yellow FG* dengan Lampu UV.....
- Gambar 34. Foto Larutan Degradasi Limbah Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Sinar Matahari.....
- Gambar 35. Spektra FT – IR Sampel Zat Warna *Remazol Yellow FG*.....
- Gambar 36. Spektra FT – IR Sampel Limbah Zat Warna *Remazol Yellow FG*...
- Gambar 37. Pola Difraksi Material Semikonduktor Grafit/TiO₂/Cu (a.) Hasil *Recycle* (b.) Hasil Sintesis
- Gambar 38. Pola Difraksi Material Semikonduktor Grafit/TiO₂-SiO₂/Cu (a.) Hasil *Recycle* (b.) Hasil Sintesis

DAFTAR LAMPIRAN

Halaman

Lampiran 1.	Bagan Prosedur Kerja Sintesis dan Karakterisasi Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/TiO ₂ /Cu (Handayani, 2006).....
Lampiran 2.	Bagan Prosedur Kerja Sintesis dan Karakterisasi Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu (Wibowo, 2006).....
Lampiran 3.	Bagan Prosedur Kerja Aplikasi Material Semikonduktor Grafit/TiO ₂ , Grafit/TiO ₂ /Cu, Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ dan Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu Hasil Sintesis untuk Degradasi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i>
Lampiran 4.	Pola Difraksi Sinar X Grafit/TiO ₂ /Cu.....
Lampiran 5.	Pola Difraksi Sinar X Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu.....
Lampiran 6.	Pola Difraksi Sinar X pada Standar JCPDS TiO ₂ Anatase, TiO ₂ Rutil TiO ₂ -SiO ₂ , SiO ₂ , dan Logam Cu.....
Lampiran 7.	Perhitungan Rasio Anatase Rutil, Rasio TiO ₂ anatase - SiO ₂ , Ratio TiO ₂ rutil - SiO ₂
Lampiran 8.	Kurva Standar Larutan Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i>
Lampiran 9.	Data Penurunan Absorbansi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Material Semikonduktor Grafit/TiO ₂ , Grafit/TiO ₂ /Cu, Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ , Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu Tanpa Sinar dan Tanpa Arus (Absorbsi).....
Lampiran 10.	Penurunan Absorbansi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Material Semikonduktor Grafit/TiO ₂ , grafit/TiO ₂ /Cu, Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ , Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu dengan Sinar UV (Fotodegradasi).....
Lampiran 11.	Data Penurunan Absorbansi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Material Semikonduktor Grafit/TiO ₂ , Grafit/TiO ₂ /Cu, Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ , Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu dengan Arus Saja (Elektrodegradasi).....
Lampiran 12.	Data Penurunan Absorbansi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Material Semikonduktor Grafit/TiO ₂ , Grafit/TiO ₂ /Cu, Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ , Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu dengan Arus dan Sinar UV (Fotoelektrodegradasi)..

Lampiran 13.	Data Penurunan Absorbansi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Material Semikonduktor Grafit/TiO ₂ , Grafit/TiO ₂ /Cu, Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ , Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu dengan Arus dan Sinar Matahari (Fotoelektrodegradasi).....
Lampiran 14.	Data Penurunan Absorbansi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Karena Pemberian Sinar UV (Fotolisis).....
Lampiran 15.	Pengukuran Intensitas Sinar Matahari.....
Lampiran 16.	Persentase Penurunan Konsentrasi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> pada 60 Menit Pertama dan Perhitungan Efektivitasnya.....
Lampiran 17.	Uji Statistik Anova.....
Lampiran 18.	Spektra FT-IR.....
Lampiran 19.	Pola Difraksi Sinar X Grafit/TiO ₂ /Cu <i>Recycle</i>
Lampiran 20.	Pola Difraksi Sinar X Grafit/Komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu <i>Recycle</i>

DAFTAR TABEL LAMPIRAN

Halaman

1.	Perhitungan Rasio Anatase Rutil Grafit/TiO ₂ /Cu.....	
2.	Perhitungan Rasio Anatase Rutil, Anatase - SiO ₂ , dan Rutil - SiO ₂ Grafit/komposit TiO ₂ - SiO ₂ /Cu.....	
3.	Pengukuran Kurva Standar I.....	
4.	Pengukuran Kurva Standar II.....	
5.	Pengukuran Kurva Standar III.....	
6.	Pengukuran Kurva Standar IV.....	
7.	Data Absorpsi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Grafit/TiO ₂ ..	
8.	Data Absorpsi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Grafit/TiO ₂ /Cu.....	
9.	Data Absorpsi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂	
10.	Data Absorpsi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu.....	
11.	Data Absorpsi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Grafit Kosong.....	
12.	Data Fotodegradasi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Grafit/TiO ₂	
13.	Data Fotodegradasi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Grafit/TiO ₂ /Cu.....	
14.	Data Fotodegradasi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂	
15.	Data Fotodegradasi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂ /Cu.....	
16.	Data Elektodegradasi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Grafit/TiO ₂	
17.	Data Elektodegradasi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Grafit/TiO ₂ /Cu.....	
18.	Data Elektodegradasi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Grafit/komposit TiO ₂ -SiO ₂	
19.	Data Elektodegradasi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Grafit/komposit TiO ₂ - SiO ₂ /Cu.....	
20.	Data Elektodegradasi Zat Warna <i>Remazol Yellow FG</i> Menggunakan Grafit Kosong.....	

21. Data Fotoelektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/TiO₂.....
22. Data Fotoelektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/TiO₂/Cu.....
23. Data Fotoelektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/komposit TiO₂-SiO₂.....
24. Data Fotoelektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu.....
25. Data Fotoelektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/TiO₂.....
26. Data Fotoelektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/TiO₂/Cu.....
27. Data Fotoelektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/kompositTiO₂-SiO₂.....
28. Data Fotoelektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/ kompositTiO₂-SiO₂/Cu.....
29. Data Fotolisis Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Sinar UV....
30. Pengukuran Intensitas Sinar Matahari.....
31. Persentase Penurunan Konsentrasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* pada 60 Menit Pertama dan Perhitungan Efektivitasnya.....
32. Data Persen Penurunan Konsentrasi Zat Warna *RemazolYellow FG* pada 60 Menit Pertama Fotoelektrodegradasi.....

DAFTAR GAMBAR LAMPIRAN

Halaman

1.	Kurva Standar I.....	
2.	Kurva Standar II.....	
3.	Kurva Standar III.....	
4.	Kurva Standar IV.....	

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Industri tekstil merupakan industri yang memberikan kontribusi yang cukup besar pada pertumbuhan ekonomi nasional. Produksi tekstil, melewati beberapa tahap proses yang semuanya berpotensi menghasilkan limbah, baik berupa limbah padat, gas maupun cair. Limbah cair industri tekstil bersumber dari proses pencelupan (*dyeing*), pencucian (*washing*), pengukuran (*sizing*), pencetakan (*printing*) dan penyempurnaan (*finishing*) (Atmaji, Wahyu, dan Edi, 1999). Dampak negatif industri tekstil terutama berasal dari proses pencelupan (*dyeing*). Limbah hasil pencelupan dapat mencemari lingkungan apabila air limbahnya langsung dibuang ke sungai atau selokan tanpa diolah terlebih dahulu. Warna limbah muncul karena adanya gugus kromofor dalam zat warna tekstil yang digunakan pada proses pencelupan. Zat warna *Remazol Yellow FG* banyak digunakan dalam industri tekstil terutama sebagai pewarna kain tekstil pada proses pencelupan. Zat warna *Remazol Yellow FG* merupakan salah satu zat warna yang cukup reaktif (Rasjid, 1976). Gugus vinil sulfon yang terdapat dalam zat warna *Remazol Yellow FG* merupakan gugus reaktif.

Secara khusus beberapa peneliti memanfaatkan semikonduktor fotokatalis pada pengolahan limbah untuk mendegradasi zat warna. Metode degradasi yang biasa digunakan adalah fotodegradasi, elektrodegradasi dan fotoelektrodegradasi. Mudjijono (1998) telah meneliti fotodegradasi zat warna *Turq blue* dan *Red RB* menggunakan katalisator TiO_2 serbuk. Gardiana (2004) melakukan fotodegradasi *Remazol Yellow* menggunakan semikonduktor ZnO . Fujisima dan Rao (1998) menggunakan TiO_2 yang terilluminasi cahaya lampu UV sebagai anoda dan elektroda Pt sebagai katoda, dan terjadi reaksi fotoelektrokimia yang merupakan hasil dari elektron tereksitasi dan *hole* pada pita konduksi dan pita valensi secara berturut-turut. Reaksi ini dapat digunakan untuk oksidasi fotokatalitik banyak bahan organik. He, C., Y. Xiong, C. Zha, X. Wang, dan X. Zhu (2003) mendegradasi zat warna *Acid Orange II* menggunakan semikonduktor

Ag-TiO₂/ITO dengan lampu merkuri. Ternyata fotoelektrodegradasi lebih efektif dibandingkan dengan proses fotodegradasi.

Partikel TiO₂ telah cukup lama digunakan sebagai fotokatalis pendegradasi berbagai senyawa organik. TiO₂ merupakan semikonduktor yang berfungsi sebagai fotokatalis yang memiliki fotoaktivitas tinggi dan stabilitas kimia (Xu, N., Z. Shu, Y. Fan., J. Dong, J. Shi, M. Z.C. Hu, 1999). TiO₂ memiliki potesial oksidasi 3,0 V (vs SHE), lebih besar daripada oksidator konvensional yang lain seperti klorin yang memiliki potensial oksidasi 1,36 V (vs SHE) dan ozon sebesar 2,07 V (vs SHE). Potensial sebesar ini cukup kuat untuk mengoksidasi kebanyakan zat organik menjadi air, asam mineral, dan karbon dioksida (Fujisima, 1998). Hoffman, M.R., S.T. Martin, W.J. Choi, dan D.W. Bahnemann (1995) menggunakan TiO₂ serbuk untuk mendegradasi mineralisasi komplet senyawa-senyawa organik, misalnya oksidasi hidrokarbon terklorinasi menjadi CO₂ dan H₂O dengan adanya foton. Namun penggunaan TiO₂ serbuk di dalam cairan tidak efisien karena dua hal : pertama, serbuk yang telah terdispersi dalam air sangat sulit diregenerasi; kedua, bila campuran terlalu keruh, maka radiasi UV tidak mampu mengaktifkan seluruh partikel fotokatalisis (Tjahjanto dan Gunlazuardi, 2001). Pembuatan lapis tipis semikonduktor merupakan salah satu cara untuk memudahkan aplikasi semikonduktor baik sebagai solar sel maupun fotokatalis dalam degradasi senyawa kimia berbahaya.

Pembuatan lapis tipis semikonduktor pada suatu substrat merupakan inovasi untuk mendapatkan semikonduktor fotokatalis yang mudah ditangani dalam aplikasi fotokatalisis (dalam arti tidak mengalami kesulitan pemisahan semikonduktor dari larutan yang didegradasi). Gunlazuardi (2001) membuat lapis tipis TiO₂ pada permukaan gelas untuk degradasi fenol. Rahmawati, Wahyuningsih, dan Pamularsih (2006) melakukan sintesis material semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂ dengan metode *chemical bath deposition* menggunakan surfaktan CTABr (*Cetyltrimethylammonium Bromide*) sebagai agen penghubung antara substrat grafit dengan material TiO₂. Material semikonduktor lapis tipis TiO₂ bersubstrat grafit yang bersifat konduktif mempunyai keuntungan antara lain

dapat dimodifikasi dengan elektrodposisi dan proses degradasi dapat dilakukan dengan bantuan arus listrik.

Apabila semikonduktor tipe n dikenai cahaya ($h\nu$) dengan energi yang sesuai, maka elektron (e^-) pada pita valensi akan pindah ke pita konduksi, dan meninggalkan lubang positif (*hole*, disingkat sebagai h^+) pada pita valensi. Terdapat kemungkinan pasangan e^- dan h^+ ini berekombinasi kembali, padahal h^+ dapat menginisiasi reaksi oksidasi dan dilain pihak e^- akan menginisiasi reaksi reduksi zat kimia yang ada disekitar permukaan semikonduktor. Berbagai usaha dilakukan untuk meningkatkan aktivitas degradasi TiO_2 dengan mencegah rekombinasi *electron – hole* sehingga meningkatkan efisiensi konversi foton ke arus listrik (%IPCE : *Induce Photon to Current Efficiency*), yang menunjukkan efektivitas sifat fotokatalitik semikonduktor. Salah satu caranya dengan penempelan logam pada permukaan lapis tipis TiO_2 . Rahmawati dan Masykur (2003) telah melakukan modifikasi permukaan TiO_2 dengan penempelan Cu secara elektrodposisi dan mendapatkan peningkatan efisiensi konversi induksi foton menjadi arus listrik dibandingkan dengan tanpa penempelan Cu pada degradasi warna larutan tetraetil amonium iodida dan I_2 dalam asetonitril.

TiO_2 mempunyai makrostruktur yang relatif rigid. Keterbatasan sifat semikonduktor tersebut diatasi dengan cara memodifikasi sifat material pembentuk semikonduktor dan memodifikasi permukaan atau struktur semikonduktor. Komposit $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ dapat memperbaiki sifat material TiO_2 , karena SiO_2 lebih bersifat fleksibel untuk dibentuk dibandingkan dengan TiO_2 .

Penelitian ini dilakukan untuk mendegradasi zat warna *Remazol Yellow FG* menggunakan semikonduktor lapis tipis grafit/ TiO_2 , grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$, grafit/ $\text{TiO}_2\text{/Cu}$ dan grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{/Cu}$. Pembuatan semikonduktor lapis tipis grafit/ TiO_2 berdasarkan sintesis Rahmawati dkk (2006) dengan konsentrasi CTABr 16.10^{-3} M dan waktu perendaman 4 hari yang merupakan kondisi optimal pada deposisi TiO_2 , dengan %IPCE paling tinggi sebesar $3,261.10^{-2}$ %. Grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ berdasarkan sintesis yang dilakukan Nugraheni (2006), dimana temperatur optimum kalsinasi 1100°C , diperoleh % IPCE maksimum sebesar $5,99 \times 10^{-2}$ %. Modifikasi dengan logam Cu

menggunakan metode elektodeposisi. Penempelan logam Cu pada Grafit/TiO₂ berdasarkan Handayani (2006) dengan arus optimum 0,030 A dengan % IPCE sebesar $14,208 \cdot 10^{-2}$ %, lebih besar 7,8 % jika dibandingkan % IPCE grafit/TiO₂/Ag sebesar $13,1 \cdot 10^{-2}$ % (Hasim, 2006). Penempelan logam Cu pada grafit/komposit TiO₂-SiO₂ berdasarkan Wibowo (2006) dengan arus optimum 0,014 A dengan % IPCE sebesar $45,5 \cdot 10^{-2}$ %. Sebenarnya % IPCE grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Ag lebih besar daripada grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu yaitu $51,5 \cdot 10^{-2}$ % (Irianti, 2006). Persen IPCEnya 11,65 % lebih besar dibandingkan grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu, namun harga per gram AgNO₃ sebagai bahan deposisi Ag dibandingkan CuSO₄.5H₂O sebagai bahan deposisi Cu lebih dari delapan kali lipat, sehingga logam Cu dipandang lebih ekonomis.

B. Perumusan Masalah

1. Identifikasi Masalah

Metode untuk mendegradasi zat warna *Remazol Yellow FG* dapat dilakukan dengan cara fotodegradasi (dengan sinar saja), elektrodegradasi (dengan arus saja), dan fotoelektrodegradasi (dengan sinar dan arus). **Perbedaan metode degradasi tersebut mungkin** memberikan keefektifan degradasi zat warna *Remazol Yellow FG* yang berbeda.

Perbedaan karakter fotokatalis material Semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂ dan hasil modifikasi material yaitu grafit/kompositTiO₂-SiO₂, serta grafit/TiO₂/Cu dan grafit/kompositTiO₂-SiO₂/Cu yang telah dimodifikasi dengan penempelan logam Cu, dapat terlihat dari perbedaan efisiensi konversi foton ke arus listrik (%IPCE : *Induce Photon to Current Efficiency*), yang menunjukkan efektivitas sifat fotokatalitik semikonduktor, mungkin akan memberikan keefektifan degradasi zat warna *Remazol Yellow FG* yang berbeda. Proses degradasi suatu larutan zat warna akan menyebabkan intensitas warnanya berkurang. Oleh karena itu, tingkat keefektifan reaksi degradasi zat warna bisa dilihat dari penurunan absorbansi larutan zat warna *Remazol Yellow FG*

menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Material semikonduktor yang paling efektif, digunakan untuk mendegradasi limbah zat warna *Remazol Yellow FG*.

Penurunan konsentrasi zat warna *Remazol Yellow FG* mungkin tidak hanya karena terdegradasi, tetapi adanya absorpsi zat warna oleh material semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂, grafit/kompositTiO₂-SiO₂, grafit/TiO₂/Cu, dan grafit/kompositTiO₂-SiO₂/Cu serta reaksi fotolisis zat warna *Remazol Yellow FG* karena cahaya.

Gerakan molekul yang tidak simetri dapat mengabsorpsi sinar IR sehingga dapat dideteksi gugus-gugus fungsinya dengan FT-IR. Dengan melihat gugus-gugus fungsi sebelum dan sesudah degradasi maka dapat dilihat terjadinya perubahan gugus fungsi setelah didegradasi yang menunjukkan adanya perubahan struktur molekul zat warna karena terdegradasi oleh material semikonduktor.

2. Batasan Masalah

Metode yang digunakan untuk mendegradasi zat warna adalah fotodegradasi, elektrodegradasi, dan fotoelektrodegradasi. Sedangkan absorpsi zat warna *Remazol Yellow FG* oleh material semikonduktor dan fotolisis zat warna *Remazol Yellow FG* karena cahaya digunakan sebagai kontrol.

Degradasi zat warna *Remazol Yellow FG* menggunakan material semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂ seperti yang berhasil disintesis Rahmawati dkk (2006), grafit/kompositTiO₂-SiO₂ hasil sintesis Nugraheni (2006), grafit/TiO₂/Cu hasil sintesis Handayani (2006) dan grafit/kompositTiO₂-SiO₂/Cu hasil sintesis Wibowo (2006). Efisiensi reaksi degradasi zat warna *Remazol Yellow FG* menggunakan material semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂ dan modifikasinya ditunjukkan adanya pengurangan absorbansi zat warna menggunakan instrumen spektrofotometer UV-Vis.

Analisis perubahan gugus fungsi zat warna akibat proses degradasi menggunakan spektra IR. Perubahan gugus fungsi zat warna *Remazol Yellow FG* menunjukkan adanya proses degradasi zat warna oleh material semikonduktor.

3. Rumusan Masalah

- a. Apakah metode fotoelektrodegradasi lebih efisien untuk mendegradasi zat warna *Remazol Yellow FG* dibandingkan metode fotodegradasi maupun elektrodegradasi ?
- b. Apakah penempelan logam Cu dapat meningkatkan efisiensi relatif degradasi zat warna *Remazol Yellow FG* ?
- c. Apakah semikonduktor lapis tipis komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ dapat meningkatkan efisiensi relatif degradasi zat warna *Remazol Yellow FG* dibandingkan dengan semikonduktor lapis tipis TiO_2 ?
- d. Apakah terjadi perubahan gugus – gugus fungsi zat warna *Remazol Yellow FG* karena proses degradasi ?

C. Tujuan Penelitian

1. Menentukan apakah metode fotoelektrodegradasi lebih efektif untuk mendegradasi zat warna *Remazol Yellow FG* dibandingkan metode fotodegradasi maupun elektrodegradasi.
2. Mengetahui apakah penempelan logam Cu dapat meningkatkan efisiensi relatif degradasi zat warna *Remazol Yellow FG*.
3. Mengetahui apakah semikonduktor lapis tipis komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ dapat meningkatkan efisiensi relatif degradasi zat warna *Remazol Yellow FG* dibandingkan dengan semikonduktor lapis tipis TiO_2 .
4. Mengetahui apakah terjadi perubahan gugus – gugus fungsi zat warna *Remazol Yellow FG* karena proses degradasi.

D. Manfaat Penelitian

Memberikan alternatif penanganan masalah limbah industri tekstil menggunakan semikonduktor grafit/ TiO_2 , grafit/ komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ dan hasil modifikasinya dengan penempelan logam tembaga (Cu) sehingga dapat dikembangkan untuk pengolahan limbah terutama limbah zat warna.

BAB II

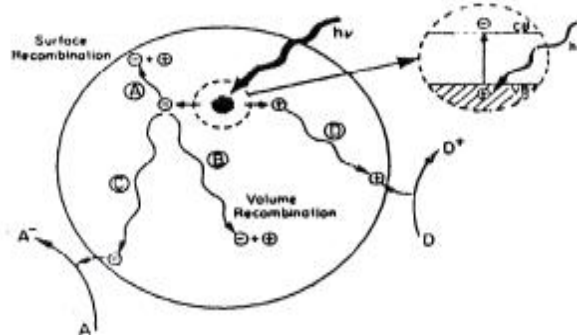
LANDASAN TEORI

A. Tinjauan Pustaka

1. Degradasi Fotoelektrokatalitik (Fotoelektrodegradasi)

Fotokatalitik adalah suatu proses yang dibantu oleh adanya cahaya dan material katalis. Dengan pencahayaan ultra violet permukaan TiO_2 mempunyai kemampuan menginisiasi reaksi kimiawi. Dalam media air, kebanyakan senyawa organik dapat dioksidasi menjadi karbondioksida dan air, berarti proses tersebut dapat membersihkan air dari pencemar organik. Senyawa - senyawa anorganik seperti sianida dan nitrit yang beracun dapat diubah menjadi senyawa lain yang relatif tidak beracun (Hoffmann, *et al.*, 1995).

Secara umum, fenomena fotokatalitik pada permukaan semikonduktor dapat dipahami dengan penjelasan seperti ditunjukkan oleh Gambar 1. Jika suatu semikonduktor tipe n dikenai cahaya ($h\nu$) dengan energi yang sesuai, maka elektron (e^-) pada pita valensi akan pindah ke pita konduksi, dan meninggalkan lubang positif (*hole*, disingkat sebagai h^+) pada pita valensi. Sebagian besar pasangan e^- dan h^+ ini akan berekombinasi kembali, baik di permukaan (jalur A) atau di dalam *bulk* partikel (jalur B). Sementara itu sebagian pasangan e^- dan h^+ dapat bertahan sampai pada permukaan semikonduktor (jalur C dan D). Dimana h^+ dapat menginisiasi reaksi oksidasi dan dilain pihak e^- akan menginisiasi reaksi reduksi zat kimia yang ada disekitar permukaan semikonduktor (Gunlazuardi, 2001).



Gambar 1. Skema fotoeksitasi yang diikuti oleh deeksitasi pada permukaan semikonduktor (Linsebigler, A.L., G. Lu, dan J.T. Yates, 1995)

Fenomena fotokatalitik pada permukaan TiO_2 dan kemungkinan aplikasi teknologinya menjadi lahan penelitian yang subur hingga saat ini. Luas jangkauan kemungkinan aplikasinya meliputi bidang-bidang : diversifikasi energi (*photoelectrochemical solar cell and water splitting*), sintesa kimia organik (*photoelectrosynthesis*), pengolahan limbah (*water or gas detoxification and disinfection*), pengembangan metode analisis (*TOC Analyzer, Selective Electrode*), bidang kedokteran (*anti cancer*) dan bidang material (*self cleaning glass and ceramics*) (Hoffmann, *et al.*, 1995).

Elektrokatalitik adalah suatu proses yang dibantu dengan aliran listrik dan material semikonduktor. Pemberian suatu beda potensial akan menimbulkan adanya aliran elektron yang mempunyai energi, sehingga mampu mempercepat suatu proses. Menurut He, *et al.* (2003), penambahan *anodic bias* pada semikonduktor lapis tipis TiO_2 menyebabkan pemisahan dari elektron tereksitasi dan *hole* dapat dipercepat. Elektrokatalitik merupakan bagian dari elektrokimia, prosesnya menggunakan prinsip elektrolisis dimana reaksi dapat terjadi bila diberi energi dari luar (reaksi tidak berjalan spontan).

Penyusun utama sel elektrokimia terdiri dari larutan elektrolit, elektroda, sirkuit luar, dan jembatan garam. Larutan elektrolit, merupakan larutan yang mampu menghantarkan aliran elektron, misalnya lelehan NaCl , larutan HCl , dan larutan KCl . Potensial akan terjadi selama ada pergerakan ion positif dan ion negatif, tetapi pergerakan atau kecepatan yang berbeda karena perbedaan ukuran antara ion positif dan negatif menimbulkan bagian yang lebih dominan positif dan sebaliknya, sehingga beda potensial terjadi karena perbedaan ukuran dan kecepatan ion bukan karena perbedaan konsentrasi, yang disebut *junction potensial*. Larutan elektrolit KCl memiliki ukuran ion K^+ dan Cl^- yang hampir sama besar sehingga kecepatan difusinya relatif sama, sehingga *junction potensial* dapat ditekan (Skoog, 1996). Elektroda adalah penghantar tempat listrik masuk ke dalam dan keluar dari zat – zat yang bereaksi. Elektroda dimana terjadi oksidasi disebut anoda dan elektroda yang mengalami reduksi disebut katoda. Dalam sirkuit luar elektron bergerak melalui kawat dari anoda menuju katoda. Elektron awalnya akan masuk ke katoda yang untuk melakukan reaksi reduksi, kemudian

lewat jembatan garam menuju anoda. Anoda menghasilkan elektron yang mengalir kembali ke sirkuit luar dan begitu seterusnya. Jembatan garam diperlukan agar memungkinkan difusi ion – ion antara setengah sel kanan dan setengah sel kiri, sehingga larutan dapat bermuatan netral. Jembatan garam diisi larutan elektrolit yang tidak berubah secara kimia dalam proses itu seperti K_2SO_4 , NaCl, KNO_3 dan KCl.

Fotoelektrokatalitik adalah suatu proses yang dibantu oleh adanya cahaya, aliran listrik dan suatu material katalis. Potensial listrik antara fotokatalitik dan elektrokatalitik diaplikasikan untuk meningkatkan mobilitas dari elektron tereksitasi pada fotokatalitik. Ichikawa dan Doi (1996) menggunakan semikonduktor fotokatalitik lapis tipis TiO_2 yang dikombinasi dengan semikonduktor ZnO/Cu sebagai elektrokatalitik untuk menghasilkan *chemical recycling* dari CO_2 yang bisa diaplikasikan untuk berbagai tujuan. Dengan fotoelektrokatalitik menggunakan lampu merkuri 500 W sebagai sumber sinar UV mampu memproduksi hidrogen dari air sekitar 26 l/h/m^2 sedangkan tanpa pemberian potensial listrik menghasilkan 0,075 sampai $0,42 \text{ l/h/m}^2$. Aplikasi *anodic bias potensial* pada permukaan elektroda TiO_2 yang dicelupkan didalam air mengurangi tingkat energi ferminya, dan karenanya menghasilkan pembentukan medan listrik didekat interface pada daerah yang disebut sebagai lapisan deplesi. Level fermi (E_f) merupakan level transisi yang tempatnya sedikit dibawah pita konduksi. Setiap elektron yang dipromosikan sebagai akibat tereksitasi oleh cahaya di daerah lapisan deplesi akan dipercepat bergerak ke dalam *bulk* material dan selanjutnya dialirkan ke *counter* elektroda melalui sirkuit luar. Sebaliknya, h^+ yang dihasilkan oleh cahaya disekitar lapisan deplesi akan dipercepat bergerak ke permukaan dimana h^+ akan bergerak bebas sebelum berekombinasi di dalam semikonduktor. Oleh karenanya, jelas bahwa medan listrik akan secara signifikan meningkatkan pemisahan muatan, sehingga meningkatkan pembentukan radikal hidroksil, suatu fenomena yang diberi nama *electric field enhancement effect* (efek peningkatan akibat medan listrik) (Gunlazuardi, 2001).

Reaksi fotodegradasi adalah reaksi pemecahan senyawa oleh adanya cahaya, yang merupakan sebuah teknik yang relatif baru untuk pengolahan polutan air dan

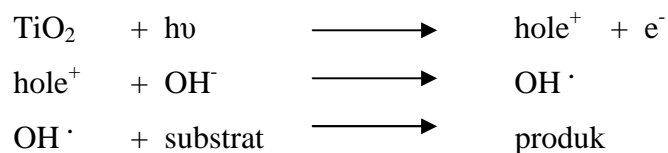
udara. Polutan yang berupa senyawa organik didestruksi secara oksidatif dengan menggunakan cahaya. Pada proses degradasi ini dikenal dua macam senyawa yang ditambahkan untuk mempercepat proses degradasi senyawa organik, yaitu oksidan kimia dan fotokatalitik yang biasanya berupa semikonduktor fotoaktif, seperti TiO_2 , ZnO atau CdS . Penelitian tentang reaksi fotodegradasi terkatalis banyak diarahkan untuk keperluan degradasi zat berwarna, misalnya Mudjijono (1998) yang meneliti fotodegradasi zat warna *Turq Blue* dan *Red RB* menggunakan katalisator TiO_2 powder. Penelitian dilakukan dengan menggunakan lampu halogen 1000 W sebagai sumber cahaya dan didapatkan hasil bahwa semikonduktor fotokatalis tersebut dapat mempercepat penguraian zat warna, diketahui dari penurunan konsentrasi zat warna berdasarkan penurunan absorbansi UV-Vis zat warna setelah degradasi.

Cahaya merupakan sumber energi foton. Radiasi cahaya dapat bersifat sebagai radiasi elektromagnetik yang memiliki sifat sebagai gelombang dan partikel. Pada saat terjadi interaksi antara cahaya dan materi, maka akan terjadi absorpsi energi oleh molekul yang terkena cahaya. Besarnya energi yang diabsorpsi tergantung pada panjang gelombang, intensitas radiasi, dan jenis ikatan kimia yang terdapat dalam molekul yang bersangkutan (Saraswati, 2003). Pada TiO_2 energi gapnya ($E_g = 3,0$ eV untuk anatase dan $E_g = 3,2$ eV untuk rutil) sebanding dengan radiasi cahaya 388 nm yang merupakan daerah aktif UV pendek. Ao, C.H., S.C. Lee, J.Z. Yu, J.H. Xu (2004) melakukan fotodegradasi formaldehid menggunakan TiO_2 5% dengan lampu UV 6 W pada $\lambda = 365$. Pada jarak 14 cm dari larutan, intensitas yang terukur sekitar $750 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Setelah 120 menit, formaldehid yang mampu terdegradasi sebesar 44,1 ppb. Sumber sinar matahari merupakan aplikasi praktis dan murah. Sinar matahari (sebagai sumber foton) dapat dimanfaatkan sebagai pengganti lampu UV, karena 10 % dari sinar matahari merupakan sinar UV (Linsebigler, *et al.*, 1995). Pada siang hari musim panas tak berawan dan di bawah sinar matahari langsung, intensitas sinar UV sekitar $120 \text{ mW}/\text{cm}^2$ (Amemiya, 2004).

Pada prinsipnya, reaksi oksidasi pada permukaan semikonduktor dapat berlangsung melalui donasi elektron dari substrat ke h^+ (menghasilkan radikal

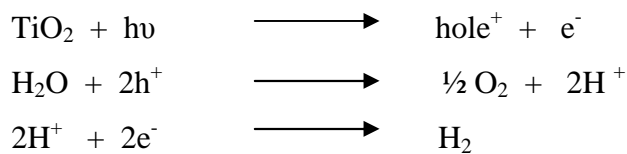
pada substrat yang akan menginisiasi reaksi berantai). Apabila potensial oksidasi yang dimiliki oleh h^+ pada pita valensi ini cukup besar untuk mengoksidasi air dan atau gugus hidroksil pada permukaan partikel maka akan menghasilkan radikal hidroksil. Radikal hidroksil adalah spesi pengoksidasi kuat yang memiliki potensial redoks sebesar 2,8 V (vs SHE) (Gunlazuardi, 2001), lebih besar daripada oksidator konvensional yang lain seperti klorin yang memiliki potensial oksidasi 1,36 V (vs SHE) dan ozon sebesar 2,07 V (vs SHE). Potensial sebesar ini cukup kuat untuk mengoksidasi kebanyakan zat organik menjadi air, asam mineral, dan karbon dioksida (Fujisima dan Rao, 1998).

Menurut Yu, J.C. and L.Y.L. Chan (1998), proses fotodegradasi akan diawali dengan oksidasi ion OH^- dari H_2O membentuk radikal, setelah suatu semikonduktor (sebagai contoh adalah TiO_2) menyerap cahaya membentuk *hole*. Mekanisme reaksi yang diusulkan adalah sebagai berikut:



Reaksi fotoelektrodegradasi merupakan reaksi yang melibatkan cahaya (foton), aliran listrik dan katalis secara bersama-sama sehingga katalis ini dapat mempercepat fotoreaksi melalui interaksinya dengan substrat baik dalam keadaan dasar atau dalam keadaan tereksitasi. Gunlazuardi (2001) melakukan fotoelektrodegradasi 10 ppm 2,4 diklorofenol menggunakan lapis tipis TiO_2 dengan bahan penyangga logam dan sebagai *counter* elektroda dari batang nikel krom dan disinari dengan lampu UV 10 W pada $\lambda = 315 - 400$ nm. Setelah waktu 4 jam didapatkan sekitar 30 – 45 % 2,4 diklorofenol bereaksi. He, *et al.* (2003) mendegradasi zat warna Acid Orange II menggunakan semikonduktor Ag- TiO_2 /ITO. Ternyata dengan metode fotoelektrodegradasi didapatkan efisiensi degradasi yang lebih tinggi dibandingkan hanya dengan proses fotodegradasi. Dengan pemberian *anodic bias* pada lapis tipis TiO_2 maka pemisahan dari elektron tereksitasi dan *hole* dapat dipercepat. *External anodic bias* pada iluminasi lapis tipis TiO_2 yang ditempel logam tidak hanya dapat memisahkan penangkapan elektron di pita konduksi dari proses oksidasi, tetapi juga dapat

mengurangi elektron yang terakumulasi pada partikel logam, mengurangi rekombinasi *hole* dan elektron serta memisahkan sisi reduksi dan oksidasi. Fujisima dan Rao (1998) mengusulkan mekanisme reaksi elektrokatalitik pada anoda dan katoda setting alat *water splitting* sebagai berikut :



2. Zat Warna

Zat warna banyak digunakan dalam berbagai industri termasuk industri tekstil. Zat warna pada dasarnya adalah racun bagi tubuh manusia, meskipun ada zat warna tertentu yang relatif aman bagi manusia yaitu zat warna yang digunakan dalam industri pangan dan farmasi.

Ada beberapa jenis zat warna yang digunakan dalam proses pencelupan. Penggolongan secara terperinci biasanya didasarkan pada sifat-sifat dan penggunaannya yaitu zat warna asam, basa, direk, mordan, belerang, bejana, dispersi dan reaktif (Isminingsih, Djufri, dan Rasjid, 1982).

a. Zat warna asam

Merupakan garam-garam natrium dari asam sulfonat dan nitrofenol. Biasanya digunakan dalam media asam. Zat warna asam merupakan zat warna yang relatif murah dan mudah didapatkan. Contoh zat warna asam antara lain: *Methyl Orange* dan *Panceau B*.

b. Zat warna basa

Merupakan zat warna tertua yang ditemukan dan diproduksi secara komersial. Zat warna ini banyak digunakan untuk pencelupan dan pencetakan. Zat warna basa merupakan turunan dari azin, azo, tioazin, tiazol maupun akridin dan umumnya berupa garam dari HCl dan ZnCl_2 untuk membentuk warnanya. Contoh dari zat warna basa adalah *Crystal Violet* dan *Rosalin*.

c. Zat warna direk

Kebanyakan dari zat warna ini adalah tiazol atau turunan dari senyawa azo dari benzidin, toluidin, diamino dan gugus yang sejenis. Zat warna direk digunakan untuk serat-serat tumbuhan pada media netral atau alkalis dan membentuk lapisan warna. Contoh zat warna direk adalah *Direct Green B*.

d. Zat warna mordan

Zat warna yang dibuat tak larut dalam suatu tekstil dengan mengkomplekskan dengan suatu ion logam yang disebut mordan. Salah satu contoh zat warna ini adalah *Alizarin* yang membentuk warna berbeda tergantung dari logam yang digunakan. *Alizarin* membentuk warna merah dengan logam Al^{3+} dan warna biru dengan logam Ba^{2+} .

e. Zat warna belerang

Biasanya diproduksi dengan mereaksikan senyawa amino aromatik dengan sulfur. Zat warna ini menghasilkan warna-warna gelap seperti biru, coklat, hijau atau hitam. Penggunaan secara luas adalah untuk pencelupan serat kapas atau pembungkus kapas, wol, linnen atau rayon.

f. Zat warna bejana

Zat warna yang diaplikasikan pada tekstil dalam bentuk terlarut dan kemudian dibiarkan bereaksi menjadi suatu bentuk tak terlarut. Contoh yang umum pada jenis zat warna ini adalah zat warna *Indigo* yang mengandung gugus indoksil yang apabila bereaksi dengan udara akan teroksidasi menghasilkan *indigo* yang tidak larut dan berwarna biru.

g. Zat warna dispersi

Zat warna dispersi merupakan zat warna organik yang digunakan secara koloid dari dispersi zat warna tersebut dalam air pada serat tekstil. Untuk menghasilkan warna yang baik biasanya digunakan sebagai zat warna rayon asetat. Golongan ini merupakan turunan dari azo, azometin dan antraknon. Contohnya adalah *Zapon Fast Yellow G* dan *Disperse Red 9*.

h. Zat warna reaktif

Zat warna reaktif adalah suatu zat warna yang dapat mengadakan reaksi dengan serat, sehingga zat warna tersebut merupakan bagian dari serat. Oleh karena itu hasil celupan zat warna reaktif mempunyai ketahanan cuci yang sangat baik. Berat molekul zat warna reaktif relatif kecil, maka kilapnya akan lebih baik daripada zat warna direk (Rasjid, 1976).

Secara umum, struktur zat warna reaktif yang larut dalam air dapat digambarkan sebagai berikut:



Dimana:

S = Gugusan pelarut, misalnya gugusan asam sulfonat, karboksilat.

K = Kromofor, berfungsi sebagai pembawa warna. Sebagai contoh adalah sistem-sistem yang mengandung gugusan azo, keton, nitro, etilen, dan piridin.

P = Gugusan penghubung antara kromofor dengan system yang reaktif, misalnya gugusan amina, sulfoamina, dan amida.

R = Sistem yang reaktif, misalnya triazin, pirimidin, dan vinil.

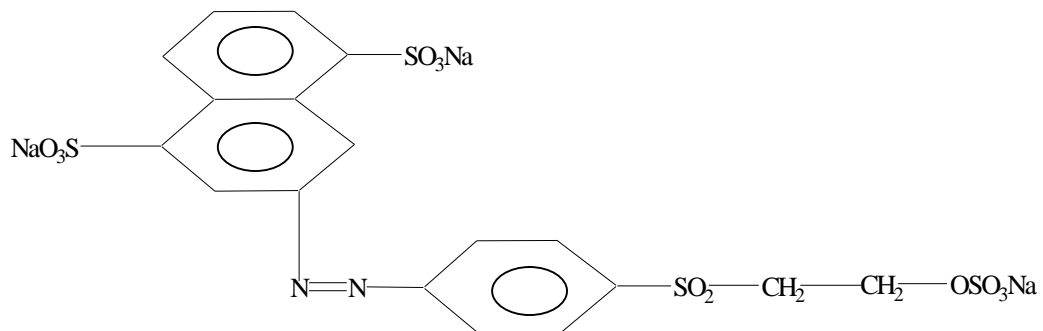
X = Gugusan reaktif, merupakan bagian dari zat warna yang mudah lepas dari sistem yang reaktif, sehingga bagian zat yang berwarna mudah bereaksi dengan serat. Misalnya gugusan klor dan sulfat (Rasjid, 1976).

Menurut reaksi yang terjadi zat warna reaktif dapat dibagi menjadi dua:

1. Zat warna reaktif yang dapat mengadakan reaksi substitusi dengan serat dan membentuk ikatan ester, misalnya: *Procion*, *Cibracon*, *Drimaren*, dan *Levafix*.
2. Zat warna reaktif yang dapat mengadakan reaksi adisi dengan serat dan membentuk ikatan eter, misalnya: *Remazol*, *Remalan*, dan *Primazin*.

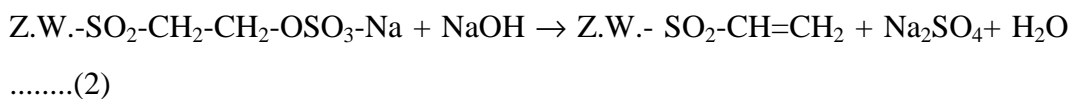
Zat Warna *Remazol Yellow FG*

Zat warna *Remazol Yellow FG* merupakan zat warna reaktif dan banyak digunakan dalam industri batik. Struktur molekul zat warna reaktif *Remazol Yellow FG* ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 2. Struktur Zat Warna *Remazol Yellow FG* (Rasjid, 1976)

Gugus reaktif merupakan bagian dari zat warna dan mudah lepas, sehingga bagian zat yang berwarna mudah bereaksi dengan serat. Reaksi dapat berjalan dengan baik memerlukan penambahan alkali atau asam sehingga mencapai suatu pH tertentu (Rasjid, 1976). Dalam larutan alkali akan terjadi reaksi seperti pada Persamaan 2:



Z.W. adalah zat warna dan gugusan $-\text{SO}_2-\text{CH}=\text{CH}_2$ adalah senyawa vinil sulfon, dimana gugus $-\text{SO}_2-$ menyebabkan terjadinya kepolaran yang kuat pada gugus radikal vinil.



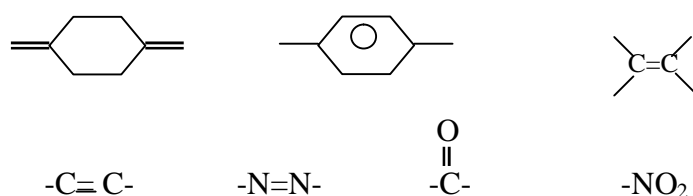
Ikatan rangkap dari senyawa (3) bereaksi dengan gugus hidroksil dari air, alkohol dan selulosa dalam reaksi:



yang merupakan ikatan kovalen dengan selulosa (Isminingsih dkk., 1982).

Disamping terjadi reaksi antara zat warna dan serat dengan membentuk ikatan primer kovalen yang merupakan ikatan ester atau eter. molekul airpun dapat juga mengadakan reaksi hidrolisa dengan molekul zat warna, dengan memberikan komponen zat warna yang tidak reaktif lagi. Reaksi hidrolisa tersebut akan bertambah cepat dengan kenaikan suhu (Rasjid, 1976).

Produksi limbah cair industri tekstil bersumber dari proses pencelupan (*dyeing*), pencucian (*washing*), pengukuran (*sizing*), pencetakan (*printing*) dan penyempurnaan (*finishing*). Limbah hasil pewarnaan pada industri tekstil mengandung komponen di antaranya sisa zat warna (*dye stuff*), garam (*glauber salt*), soda kaustik (*caustic soda*) dan bahan-bahan aditif seperti urea, sodium alginate, sodium bicarbonat serta air (sisa pewarnaan dan pencucian). Kurang lebih 24% dari zat warna, 67% dari garam-garam yang digunakan pada proses pewarnaan lolos sebagai limbah. Zat aditif umumnya dapat dimurnikan secara fisis dengan koagulasi dan filtrasi, namun warna limbahnya secara fisis tidak dapat dihilangkan, karena zat warna mengandung gugus-gugus kromofor yang sangat stabil (Gambar 3). Gugus-gugus kromofor tersebut yang menyebabkan limbah cair industri tekstil hasil pengolahan yang sudah jernih menjadi berwarna kembali setelah kurang lebih 5 menit kontak dengan udara (teroksidasi).



Gambar 3. Gugus-gugus kromofor pada zat warna (Atmaji, *et al.*, 1999)

Aplikasi semikonduktor untuk mengatasi beberapa kontaminan telah dilakukan pada beberapa senyawa seperti alkana, alkohol alifatik, asam karboksilat aromatik, zat warna, PCB, alkena, surfaktan dan pestisida. Dalam beberapa kasus bahkan semikonduktor mampu mendegradasi sampai mineralisasi komplet senyawa-senyawa organik, misalnya oksidasi hidrokarbon terklorinasi menjadi CO_2 dan H_2O oleh TiO_2 dengan adanya foton (Hoffman, *et al.*, 1995).

3. Lapis Tipis TiO_2 dan Modifikasinya sebagai Semikonduktor Fotokatalis

a. Semikonduktor Lapis Tipis TiO_2

Partikel TiO_2 telah cukup lama digunakan sebagai fotokatalis pendegradasi berbagai senyawa organik. TiO_2 merupakan semikonduktor yang berfungsi

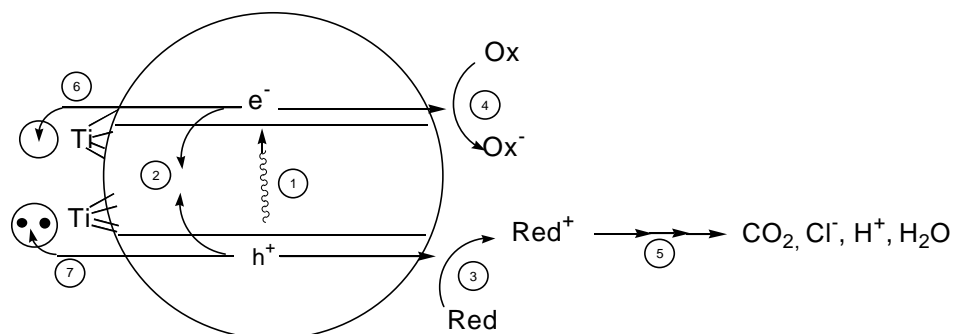
sebagai fotokatalis yang memiliki fotoaktivitas tinggi. Selain itu TiO_2 juga bersifat non toksik, murah, dan memiliki sifat redoks yaitu mampu mengoksidasi polutan organik dan mereduksi sejumlah ion logam dalam larutan serta tersedia secara komersial dan preparasinya mudah dilakukan di laboratorium. Sifatnya yang anorganik menjadikannya tidak cepat rusak sehingga proses yang diinginkan dapat lebih lama dan relatif menekan biaya operasional (Xu, *et al.*, 1999). Berdasarkan sifat-sifat itulah TiO_2 dipandang sebagai semikonduktor katalis yang paling tepat untuk mengoksidasi atau mereduksi polutan organik. Efisiensi fotokatalitik TiO_2 sangat besar dipengaruhi oleh struktur kristal, ukuran partikel, luas permukaan, dan porositas yang berbeda-beda tergantung dari metode preparasinya. Bentuknya yang serbuk menyebabkannya mempunyai luas muka yang besar sehingga efektif sebagai katalis maupun *catalyst support*. Cara paling nyata untuk memperbaiki efisiensi fotokatalitik reaksi oksidasi adalah dengan meningkatkan luas muka fotokatalis. Secara praktek dibutuhkan partikel – partikel kecil TiO_2 dengan luas muka yang tinggi yang cocok pada *support inert* sehingga mudah untuk mendapatkan kembali *effluent* yang diolah. Solusi alternatifnya adalah dengan mendukung partikel TiO_2 pada material – material berpori dengan ukuran partikel yang tepat dan ini telah diteliti terhadap silika gel, karbon aktif, pasir, lempung, dan zeolit (Xu, *et al.*, 1999). Rahmawati dan Masykur (2003) melakukan penempelan TiO_2 teknis pada permukaan grafit dan terbukti mampu bertindak sebagai fotokatalis pada degradasi warna larutan tetraetil amonium iodida dan I_2 dalam asetonitril pada pemberian sinar dengan panjang gelombang pada range UV – Visibel.

Hoffman, *et al.* (1995) menggunakan TiO_2 serbuk untuk mendegradasi mineralisasi komplet senyawa-senyawa organik, misalnya oksidasi hidrokarbon terklorinasi menjadi CO_2 dan H_2O dengan adanya foton. Xu, *et al.* (1999) mendegradasi methylen blue pada larutan TiO_2 tersuspensi. Namun penggunaan TiO_2 serbuk di dalam cairan tidak efisien karena dua hal : pertama, serbuk yang telah terdispersi dalam air sangat sulit digenerasai; kedua, bila campuran terlalu keruh, maka radiasi UV tidak mampu mengaktifkan seluruh partikel fotokatalitik (Tjahjanto dan Gunlazurdi, 2001). Pembuatan lapis tipis semikonduktor

merupakan salah satu cara untuk memudahkan aplikasi semikonduktor baik sebagai solar sel maupun fotokatalis dalam degradasi senyawa kimia berbahaya. Pembuatan lapis tipis semikonduktor pada suatu substrat merupakan inovasi untuk mendapatkan semikonduktor fotokatalis yang mudah ditangani dalam aplikasi fotokatalitik (dalam arti tidak mengalami kesulitan pemisahan semikonduktor dari larutan yang didegradasi) sehingga memungkinkan penggunaan lebih dari satu kali karena pencucian mudah dilakukan.

Rahmawati dkk (2006) melakukan sintesis material semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂ menggunakan metode *chemical bath deposition* (deposisi dari larutan kimia) menggunakan surfaktan CTABr sebagai agen penghubung antar antara substrat grafit dengan material TiO₂ yang terbentuk dari hidrolisis TiCl₄. Variasi konsentrasi surfaktan CTABr yang digunakan adalah 4, 8, 12, dan 16 .10⁻³ M, dengan variasi waktu perendaman selama 2, 3, dan 4 hari dengan pemanasan yang kontinyu pada suhu 60° C kemudian dikalsinasi 450⁰C selama 4 jam. Konsentrasi CTABr 16.10⁻³ M dan waktu perendaman 4 hari ini merupakan kondisi optimal pada deposisi TiO₂, hal ini ditunjukkan dari efisiensi konversi foton ke arus listrik, yang menunjukkan efektivitas sifat fotokatalitik semikonduktor, (%IPCE : *Induce Photon to Current Efficiency*) paling tinggi sebesar 3,261. 10⁻² %.

Mekanisme yang menggambarkan efek fotokatalitik dari TiO₂ dapat diamati dari Gambar 4.



Gambar 4. Mekanisme perpindahan elektron karena pengaruh cahaya pada TiO₂ (Hoffman *et al*,1995)

Pada Gambar 4 menunjukkan tahapan utama mekanisme fotokatalitik pada semikonduktor TiO_2 yang meliputi :

1. Pembentukan pembawa muatan oleh foton : jika suatu semikonduktor fotokatalitik dikenai suatu energi foton $h\nu$ maka elektron pada pita valensi akan tereksitasi ke pita konduksi (e_{cb-}) sambil meninggalkan *hole* pada pita valensi (h_{vb+}).
2. Rekombinasi pembawa muatan : elektron pada pita konduksi (e_{cb-}) dan *hole* pada pita valensi (h_{vb+}) akan bergabung menghasilkan energi panas.
3. Inisiasi reaksi oksidasi oleh *hole* pada pita valensi (h_{vb+}), yang akan bereaksi dengan substrat atau reduktor.
4. Inisiasi reaksi reduksi oleh elektron pada pita konduksi (e_{cb-}), yang akan bereaksi dengan oksidator yaitu oksigen.
5. Reaksi fotoreduksi terkatilisis dan reaksi termal lanjutan (reaksi dengan oksigen aktif) akan menghasilkan gas CO_2 atau zat-zat mineral.
6. Penjebakan elektron pada pita konduksi kedalam ikatan pada permukaan membentuk Ti(III) .
7. Penjebakan *hole* pada pita valensi ke dalam gugus titaniol dipermukaan.

Semikonduktor TiO_2 dengan *energi gap* lebar (3,2 eV; $\lambda_g = 388 \text{ nm}$) memiliki makrostruktur yang relatif rigid. Keterbatasan yang dimiliki oleh TiO_2 ini dapat diperbaiki dengan cara memodifikasinya. Modifikasi material semikonduktor TiO_2 merupakan upaya peningkatan efektifitas fotokatalitik semikonduktor, pencegahan rekombinasi *electron – hole* sehingga meningkatkan efisiensi konversi foton ke arus listrik (%IPCE : *Induce Photon to Current Efficiency*) dan peningkatan stabilitas fotokimia.

b. Semikonduktor Lapis Tipis Komposit $\text{TiO}_2 - \text{SiO}_2$

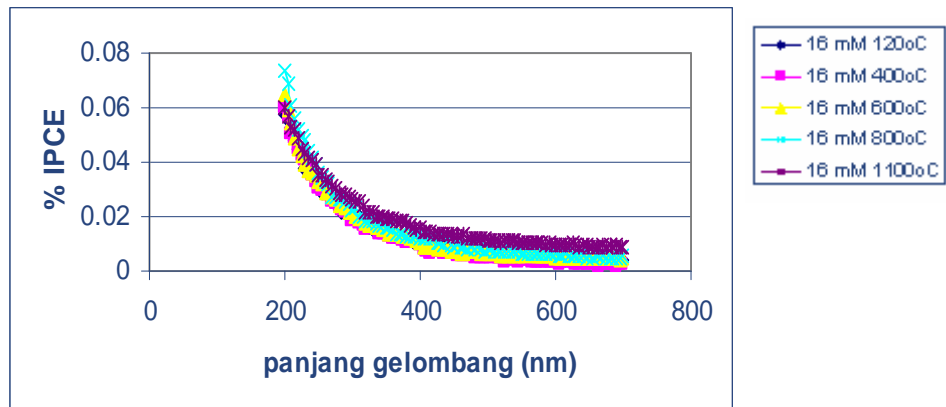
SiO_2 merupakan bahan yang lebih fleksibel serta sebagai bahan optik transparan, oleh karena itu dimungkinkan pembuatan komposit $\text{TiO}_2 - \text{SiO}_2$. Namun demikian dalam penambahan SiO_2 perlu dilakukan pengontrolan, karena porositas bahan, tingkat keseragaman pori dan homogenitas sebaran logam pada

semikonduktor merupakan faktor-faktor yang juga menentukan kualitas bahan semikonduktor (Nugraheni, 2006).

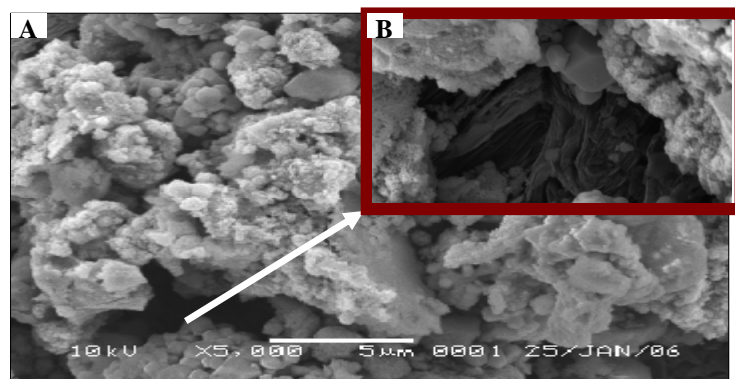
Komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ kemungkinan dapat memperbaiki sifat material TiO_2 , karena SiO_2 lebih bersifat fleksibel untuk dibentuk dibandingkan dengan TiO_2 yang makrostrukturnya relatif rigid. $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ mempunyai ciri-ciri yang sesuai untuk aplikasi khusus, berdasarkan pada koefisien ekspansi *thermal*nya yang rendah dan indeks *refraksi* yang dapat dikontrol. Kimia sol-gel dan sintesis hidrotermal adalah salah satu alternatif pembuatan material $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ karena proses tersebut memerlukan temperatur yang rendah. Sistem $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ memiliki kemampuan untuk memisahkan fasa SiO_2 dan fasa TiO_2 yang memiliki kemampuan homogenitas dengan skala nano dan dapat meningkatkan ketipisan optik. Campuran oksida silika–titania dapat dipakai dalam material katalis atau katalis pendukung, reaktivitas permukaan sangat bergantung pada komposisi dan homogenitas campuran (Rainho, J.P., J. Rocha, L.D. Carlos, R.M. Almeida, 2001).

Nugraheni (2006) berhasil mensintesis material komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ dengan bahan awal SiO_2 menggunakan Na_2SiO_3 yang dilarutkan dalam campuran metanol, HCl 37%, H_2O dan CTABr. Sedangkan bahan awal TiO_2 menggunakan TiCl_4 dalam campuran metanol dan isobutanol sebagai pengompleks untuk mengurangi kecepatan hidrolisis dari TiCl_4 . Serbuk komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ hasil sintesis dikalsinasi secara bertahap untuk membentuk kristal komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ dengan kecepatan pemanasan $5^\circ\text{C}/\text{menit}$ pada variasi temperatur 120, 400, 600, 800, dan 1100°C . Material komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ tersebut kemudian dideposisikan pada grafit dengan menggunakan metode *dip coating*. Teknik *dip coating* merupakan salah satu proses penempelan suatu larutan sintesis pada substrat. Substrat yang akan ditemplei dimasukkan ke dalam larutan sintesis kemudian diangkat dengan kecepatan tertentu dengan temperatur terkontrol dan pada kondisi atmosfer. Hasil pengukuran % IPCE menunjukkan bahwa grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ pada temperatur kalsinasi 1100°C , diperoleh % IPCE maksimum yaitu sebesar $5,99 \cdot 10^{-2} \%$. Grafik % IPCE material semikonduktor grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ pada berbagai variasi temperatur kalsinasi ditunjukkan oleh Gambar

5. Morfologi material semikonduktor grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ditunjukkan oleh Gambar 6. Pada Gambar 6 (insert) (B) terlihat pori dengan ukuran sekitar 6670 nm yang dapat digolongkan sebagai makropori. Tampak pula bahwa partikel-partikel di sekitar pori bentuknya beragam, hal ini karena pada semikonduktor grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ terdapat fase-fase $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$, TiO_2 dan SiO_2 .

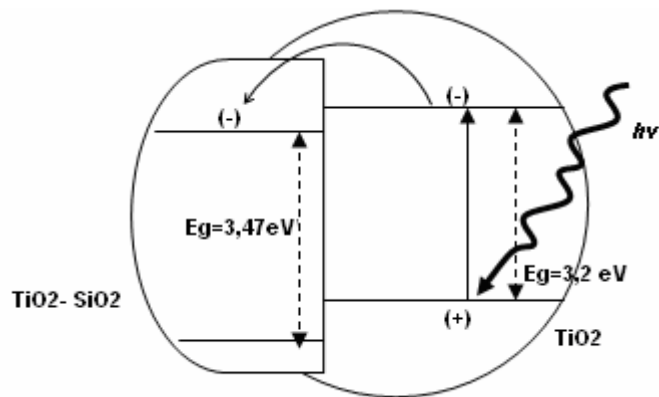


Gambar 5. Persen IPCE dari semikonduktor grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ dengan variasi temperatur kalsinasi (Nugraheni, 2006)



Gambar 6. Morfologi komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ yang ditempel pada grafit dengan (A) 5000x dan (B) 10000x (insert) (Nugraheni, 2006)

Fenomena proses fotoeksitasi yang terjadi pada semikonduktor lapis tipis grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ dapat dilihat pada Gambar 7.



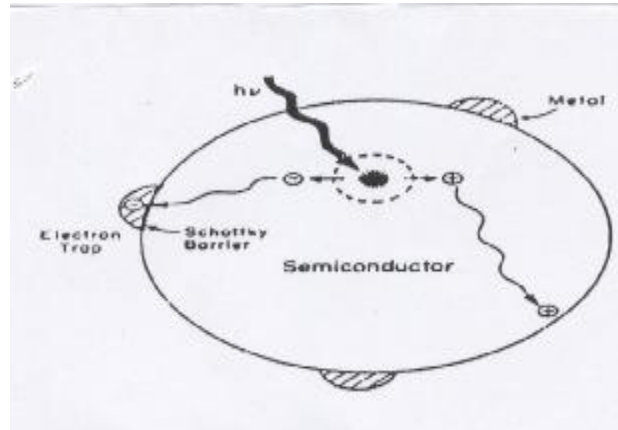
Gambar 7. Proses fotoeksitasi semikonduktor lapis tipis grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ($E_{g\text{TiO}_2\text{-SiO}_2} = 3,47 \text{ eV}$ (Nugraheni, 2006); $E_{g\text{TiO}_2} = 3,2 \text{ eV}$ (Linsebigler, *et al.*, 1995))

c. Semikonduktor Lapis Tipis TiO_2 dan Komposit $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$
Termodifikasi Cu

Penempelan logam pada permukaan semikonduktor merupakan salah satu metode modifikasi permukaan semikonduktor. Logam dapat meningkatkan produk fotokatalitik atau meningkatkan kecepatan reaksi fotokatalitik. Peningkatan reaksi fotokatalitik tersebut pertama kali diamati oleh Sato dan White (1980) pada konversi H_2O menjadi O_2 dan H_2 . Penempelan Cu pada permukaan TiO_2 dapat meningkatkan produksi H_2 dari alkohol. Kenaikan produksi H_2 tersebut dipicu oleh penjerapan elektron pada situs logam. Peningkatan produksi H_2 yang lebih besar diamati pada semikonduktor TiO_2 yang dimodifikasi dengan Ti, TiO_2/Ti (Ichikawa dan Doi, 1991). Rahmawati dan Masykur (2003) telah melakukan modifikasi permukaan TiO_2 dengan penempelan Cu secara elektrolisis dan mendapatkan peningkatan efisiensi konversi induksi foton menjadi arus listrik dibandingkan dengan tanpa penempelan Cu.

Mekanisme migrasi elektron pada permukaan semikonduktor yang termodifikasi logam melalui tahap eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi dan setelah mengalami eksitasi, elektron bermigrasi menuju logam dan terperangkap dalam logam (Gambar 8), sehingga rekombinasi *electron-hole* dapat ditekan, dan *hole* leluasa berdifusi ke permukaan semikonduktor di mana pada permukaan tersebut akan terjadi oksidasi senyawa-senyawa yang didegradasi.

Logam sendiri mempunyai aktifitas katalitik dan memodifikasi sifat fotokatalitik semikonduktor melalui perubahan distribusi elektronnya.

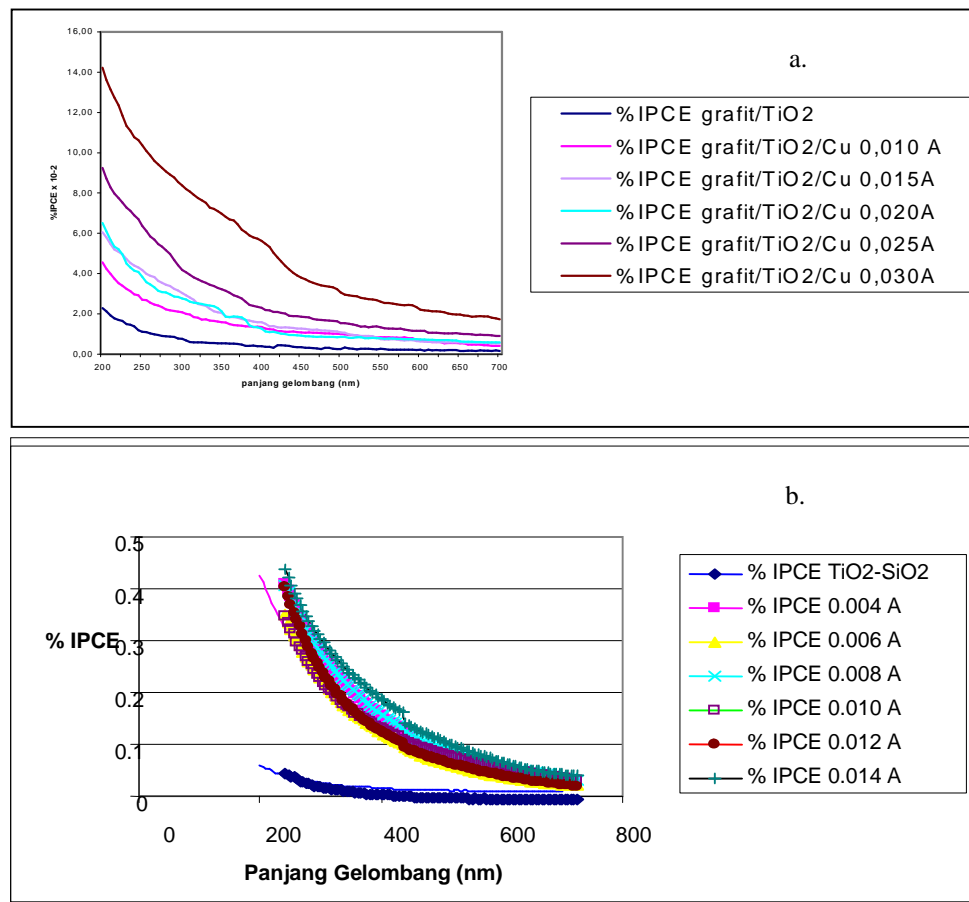


Gambar 8. Mekanisme migrasi elektron pada permukaan semikonduktor termodifikasi logam (Linsebigler, *et al.*,1995)

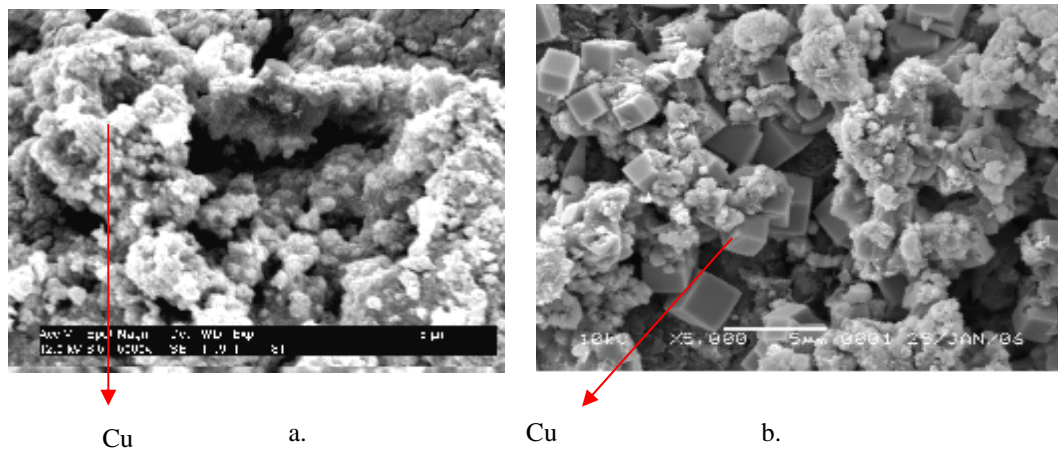
Modifikasi elektronik permukaan semikonduktor melalui deposisi logam dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa logam mulia (logam yang tidak mudah teroksidasi). Secara umum pemilihan logam sebagai penjebak elektron didasarkan pada sifatnya yang tidak mudah teroksidasi atau yang mempunyai potensial reduksi tinggi, sehingga logam-logam tersebut bertindak sebagai akseptor elektron. Misalnya logam tembaga (Cu) yang mempunyai potensial reduksi 0,340 volt, dan logam Ag yang memiliki potensial reduksi 0,799 volt.

Handayani (2006) melakukan penempelan logam Cu dengan metode elektrodposisi pada permukaan semikonduktor grafit/TiO₂ dengan variasi arus. Ternyata hasil % IPCE terbesar menggunakan arus terkontrol 0,030 A sebesar $14,208 \cdot 10^{-2} \%$. Hasim (2006) juga berhasil mendeposisikan logam Ag pada permukaan semikonduktor grafit/TiO₂. Pada kondisi optimal dengan arus elektrodposisi 0,30 A pada penelitian tersebut diperoleh nilai %IPCE sebesar $13,1 \cdot 10^{-2} \%$. Wibowo (2006) melakukan pendeposisian logam Cu pada permukaan material semikonduktor lapis tipis grafit/komposit TiO₂-SiO₂, didapatkan %IPCE maksimum pada arus 0,014 A sebesar $45,5 \cdot 10^{-2} \%$. Irianti (2006) melakukan pendeposisian logam Ag pada permukaan material

semikonduktor lapis tipis grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$, didapatkan %IPCE maksimum pada arus 0,014 A sebesar $51,5 \cdot 10^{-2} \%$. Gambar 9 menunjukkan grafik % IPCE dari semikonduktor grafit/ $\text{TiO}_2\text{/Cu}$ dan grafit/ komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{/Cu}$ dengan berbagai variasi arus deposisi. Morfologi semikonduktor grafit/ $\text{TiO}_2\text{/Cu}$ dan grafit/ komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{/Cu}$ ditunjukkan oleh Gambar 10. Ukuran diameter pori yang terbentuk sekitar 5 sampai 10 μm sehingga dapat digolongkan sebagai makropori. Pori yang tampak inilah (berwarna lebih gelap) dimungkinkan sebagai tempat menempelnya logam Cu pada proses elektrodposisi. Berdasarkan skala yang terdapat pada Gambar 10 diperoleh ukuran *cluster* Cu sekitar 2,5 – 5 μm .



Gambar 9. Hubungan %IPCE *versus* panjang gelombang (nm) (a) Grafit/ $\text{TiO}_2\text{/Cu}$ (Handayani, 2006) dan (b) grafit/ komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{/Cu}$ (Wibowo, 2006)



Gambar 10. Morfologi (a) Grafit/TiO₂/Cu arus elektrodeposisi 0,030 A dengan perbesaran 5000x (Handayani, 2006) dan (b) Grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu arus deposisi 0,014 A dengan perbesaran 5000x (Wibowo, 2006)

4. Analisis

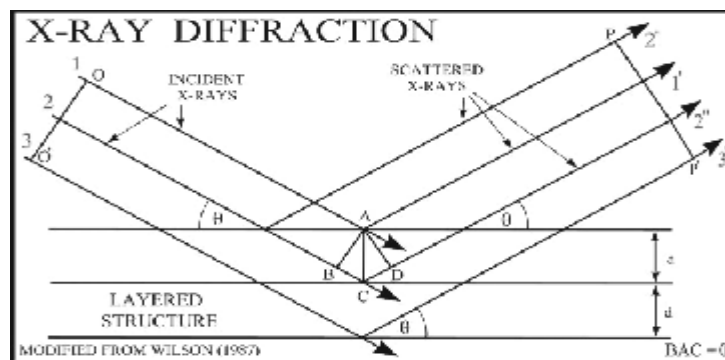
a. Difraksi Sinar X

Sinar X merupakan gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang (λ) khas sebesar 0,1 nm. Bila elektron-elektron dari suatu kawat pijar yang dipanasi dipercepat melalui suatu perbedaan potensial yang besar dan diperbolehkan menumbuk suatu sasaran logam di dalam sebuah tabung sinar X maka sinar X dihasilkan dengan suatu distribusi λ yang kontinu. Jika sinar X itu kemudian menumbuk sebuah kristal, maka sinar X yang direfleksikan akan membentuk titik-titik luas yang sangat tinggi intensitasnya pada sebuah *layer/film*. Titik-titik itu ditimbulkan oleh interferensi konstruktif dari gambar-gambar kecil yang dihasilkan oleh banyak atom. Sinar X akan menunjukkan pola difraksi jika jatuh pada benda yang jarak antar bidangnya kira – kira sama dengan λ , jatuh mengenai kristal dengan sudut θ pada bidang – bidang kristal. Sudut difraksi sinar X ditunjukkan oleh Gambar 11. Berdasarkan Gambar 11, jika gelombang direfleksikan dari C (sinar datang) memperkuat gelombang yang direfleksikan dari A (sinar pantul), maka perbedaan lintasan antara gelombang tersebut sebanding dengan $n\lambda$. Perbedaan lintasan adalah $BC + CD$, jadi $BC + CD = n\lambda$.

Sedangkan $BC = CD$ dan $CD = d \sin \theta$, sehingga menjadi persamaan Bragg's (Persamaan 5) :

$$2 d \sin \theta = n \lambda \dots \dots \dots (5)$$

Keterangan : d = Jarak *interplanar* atau *interatom*
 λ = Panjang gelombang logam standar
 θ = Kisi difraksi sinar X (West, 1984)



Gambar 11. Sudut difraksi sinar X (West, 1984)

Difraksi sinar X atau biasa disebut XRD merupakan alat yang digunakan untuk mengetahui pengaturan atom-atom dalam sebuah tingkat molekul. Pengaturan atom-atom tersebut dapat diinterpretasikan melalui analisa *d spacing* dari data difraksi sinar X. Nilai *d spacing* sangat tergantung pada pengaturan atom dan struktur jaringan polimer dalam material. Selain nilai *d spacing*, observasi tingkat kristalinitas bahan dan perubahan struktur mesopori dapat pula diketahui melalui data difraksi sinar X. Puncak yang melebar menunjukkan kristalinitas rendah (amorf), sedangkan puncak yang meruncing menunjukkan kristalinitas yang lebih baik (Park, N.G., G. Schlichthorl, J. Van de Lagemaat, H.M. Cheong, A. Mascarenhas, A.J. Frank, 2002).

Difraksi sinar-X sangat penting pada identifikasi senyawa kristalin. Kekuatan dari cahaya yang terdifraksi tergantung pada kuantitas material kristalin yang sesuai di dalam sampel sehingga sangat mungkin mendapatkan analisa kuantitatif dari sejumlah relatif konstituen dari campuran senyawa padatan (Ewing, 1960).

Suatu zat selalu memberikan pola difraksi yang khas. Apakah zat itu dalam keadaan murni atau merupakan campuran zat. Hal ini merupakan dasar dari analisa kualitatif secara difraksi sedangkan analisa kuantitatif berdasarkan intensitas garis difraksi yang sesuai dengan salah satu komponen campuran bergantung pada perbandingan konstituen tersebut.

Hanawalt dalam tahun 1936 membuat kumpulan pola difraksi dari sejumlah zat yang diketahui. Setiap pola bubuk dikarakterisasi oleh kedudukan garis 2θ dan I (intensitas) tetapi karena kedudukan garis tergantung pada panjang gelombang yang digunakan maka besaran yang lebih fundamental adalah jarak d dari bidang kisi sehingga Hanawalt menyusun masing-masing pola berdasarkan nilai d dan I dari garis difraksinya (Jenkins dan White, 1988).

Langkah - langkah yang ditempuh dalam analisa kualitatif adalah sebagai berikut :

1. Membuat pola difraksi dari zat tidak diketahui.
2. Menghitung nilai d setiap garis atau dengan menggunakan tabel yang memberikan hubungan antara d dan 2θ untuk berbagai karakteristik.
3. Memandang data d eksperimental dengan data d dari tabel dengan kemungkinan kesalahan dalam setiap set nilai adalah $\pm 0,02 \text{ \AA}$.
4. Membandingkan intensitas relatifnya dengan nilai - nilai yang ada pada tabel (standar).

b. Spektra UV-Vis

Pada spektrofotometer UV, sinar kontinyu dihasilkan oleh lampu awan muatan hidrogen atau deuterium (D_2), sedangkan sinar Visibel dihasilkan oleh lampu Wolfram. Panjang gelombang cahaya UV-Vis jauh lebih pendek daripada panjang gelombang radiasi IR. Panjang gelombang UV-Vis berada pada kisaran 180 – 800 nm.

Prinsip dasar spektroskopi UV-Vis adalah terjadinya transisi elektronik yang disebabkan penyerapan sinar UV-Vis yang mampu mengeksitasi elektron dari orbital yang kosong. Umumnya, transisi yang paling mungkin adalah transisi pada tingkat tertinggi (HOMO) ke orbital molekul yang kosong pada tingkat terendah (LUMO). Pada sebagian besar molekul, orbital molekul terisi pada tingkat energi

terendah adalah orbital σ yang berhubungan dengan ikatan σ , sedangkan orbital π berada pada tingkat energi yang lebih tinggi. Orbital non ikatan (n) yang mengandung elektron–elektron yang belum berpasangan berada pada tingkat energi yang lebih tinggi lagi, sedangkan orbital–orbital anti ikatan yang kosong yaitu σ^* dan π^* menempati tingkat energi yang tertinggi.

Absorpsi cahaya UV-Vis mengakibatkan transisi elektronik, yaitu promosi elektron-elektron dari orbital keadaan dasar yang berenergi rendah ke orbital keadaan dasar yang berenergi tinggi. Transisi ini memerlukan 40–300 kkal/mol. Panjang gelombang cahaya UV-Vis bergantung pada mudahnya promosi elektron. Molekul–molekul yang memerlukan lebih banyak energi untuk promosi elektron akan menyerap pada panjang gelombang yang lebih pendek. Molekul yang memerlukan energi yang lebih sedikit akan menyerap pada panjang gelombang yang lebih panjang. Senyawa yang menyerap cahaya pada daerah tampak (yaitu senyawa yang berwarna) mempunyai elektron yang lebih mudah dipromosikan daripada senyawa yang menyerap pada panjang gelombang UV yang lebih pendek.

Terdapat dua jenis pergeseran pada spektra UV-Vis, yaitu pergeseran ke panjang gelombang yang lebih besar disebut pergeseran merah (*red shift*), yaitu menuju tingkat energi yang lebih rendah, dan pergeseran ke panjang gelombang yang lebih pendek disebut pergeseran biru (*blue shift*), yaitu menuju ke tingkat energi yang lebih tinggi (Hendayana, 1994).

Intensitas penyerapan dijelaskan dengan hukum lambert-beer, dimana fraksi cahaya yang diabsorpsi tidak tergantung pada kekuatan sumber cahaya mula – mula dan fraksi yang diabsorpsi tergantung pada banyaknya mol (ketebalan/konsentrasi) yang dapat mengabsorpsi. Oleh karena itu absorpsi cahaya merupakan fungsi dari molekul yang mengabsorpsi, maka cara yang tepat untuk menyatakan absorbansi adalah:

$$A = \epsilon b C \dots\dots\dots(6)$$

Dimana : ϵ : absorptivitas molar ($\text{mol}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{L}$)

b : tebal lintasan (cm)

C : konsentrasi larutan (mol L⁻¹)

Dengan menggunakan metode kurva kalibrasi, yaitu dengan membuat grafik absorbansi versus konsentrasi dapat diperoleh suatu kurva linier. Melalui pengukuran absorbansi suatu sampel dan menginterpolasikannya ke kurva kalibrasi, maka konsentrasi sampel dapat ditentukan (Underwood, A.L. dan R.A. Day, 1981).

c. Spektroskopi Infra Merah (IR)

Atom–atom di dalam suatu molekul tidak diam melainkan bervibrasi (bergetar). Ikatan kimia yang menghubungkan dua atom dapat dimisalkan sebagai dua bola yang dihubungkan oleh suatu pegas.

Bila radiasi infra merah dilewatkan melalui suatu cuplikan, maka molekul–molekulnya dapat menyerap energi dan terjadilah transisi di antara tingkat vibrasi dasar (*ground state*) dan tingkat vibrasi tereksitasi (*excited state*).

Daerah dimana vibrasi terjadi dapat diperkirakan berdasarkan Hukum Hooke seperti ditunjukkan oleh Persamaan 7 :

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{f(m_1+m_2)/m_1m_2} \dots\dots\dots(7)$$

dimana,

ν = bilangan gelombang (cm⁻¹)

c = kecepatan cahaya (cm s⁻¹)

m₁ = massa atom 1 (g)

m₂ = massa atom 2 (g)

f = tetapan gaya (dyne cm⁻¹ = g s⁻²) (Hendayana, 1994).

Walaupun spektrum infra merah suatu molekul poli atom sangat rumit untuk dianalisis dalam setiap absorpsi, gugus fungsional untuk suatu molekul tampak pada daerah–daerah yang spesifik. Daerah absorpsi infra merah dari beberapa gugus fungsional ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Harga absorpsi infra merah beberapa gugus fungsi (Silverstein, D.F, P.W. Atkins, T.C. Morill, 1986)

Ikatan	Daerah absorpsi (cm^{-1})
Tekukan C—H aromatik sidik jari	900 - 675
Uluran C-C lemah	1200 - 800
Uluran C-N	1250-1020
Tekukan C-H	1465-1400
Uluran N=N	1580 - 1500
Uluran SO_3^- garam sulfonat	1175 - 1055
Uluran C=C aromatik	1660 - 1600
Uluran CH_2 tak simetrik	2930 - 2920
Uluran OH melebar dari air	3500 - 3300
Uluran N-H	3500 - 3300

B. Kerangka Pemikiran

Degradasi zat warna dapat dilakukan dengan metode fotodegradasi, elektrodegradasi dan fotoelektrodegradasi. Fotodegradasi merupakan reaksi degradasi dengan bantuan cahaya dan material katalis. Elektrodegradasi merupakan reaksi degradasi menggunakan material katalis dengan bantuan aliran listrik. Fotoelektrodegradasi merupakan reaksi degradasi yang melibatkan cahaya (foton), aliran listrik, dan katalis secara bersama-sama sehingga katalis ini dapat mempercepat fotoreaksi melalui interaksinya dengan substrat baik dalam keadaan dasar atau dalam keadaan tereksitasi. He, *et al.* (2003) mendegradasi zat warna *Acid Orange II* menggunakan semikonduktor TiO_2/ITO dengan metode fotoelektrodegradasi lebih efisien dibandingkan dengan metode fotodegradasi.

Handayani (2006) melakukan penempelan logam Cu dengan metode elektrodposisi pada permukaan semikonduktor grafit/ TiO_2 menggunakan arus terkontrol 0,030 A, didapatkan %IPCE sebesar $14,208 \cdot 10^{-2}$ %. Terjadi peningkatan 77,04 % bila dibanding % IPCE grafit/ TiO_2 hasil sintesis Rahmawati

dkk (2006) sebesar $3,261 \cdot 10^{-2} \%$. Wibowo (2006) juga melakukan pendeposisian logam Cu pada permukaan material semikonduktor lapis tipis grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$, didapatkan %IPCE maksimum pada arus 0,014 A sebesar $45,5 \cdot 10^{-2}$, mengalami kenaikan 87,71 % dibandingkan grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ sebesar $5,99 \cdot 10^{-2} \%$ (Nugraheni, 2006). Hasil efisiensi konversi foton ke arus listrik (%IPCE : *Induce Photon to Current Efficiency*) merupakan efektivitas perubahan induksi foton ke arus listrik, dimana arus listrik merupakan aliran elektron yang merupakan hasil dari eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Sehingga %IPCE menunjukkan efektivitas sifat fotokatalitik semikonduktor.

Dalam material komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ terdapat banyak fase seperti fase $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$, TiO_2 anatase, TiO_2 rutil, dan SiO_2 dimana akan memberikan pengaruh terhadap jalannya eksitasi elektron dan arah aliran elektron. Fase – fase tersebut juga memiliki energi gap yang berbeda - beda sehingga akan mempengaruhi efek fotokatalitik. Setelah terbentuk komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ maka aliran elektron dari TiO_2 ke SiO_2 teraktifkan dan dengan demikian mengurangi rekombinasi h^+ . Ketika elektron berada pada SiO_2 elektron akan berada jauh dari hole sehingga rekombinasi akan sulit terjadi. Hal itu yang menyebabkan semikonduktor lapis tipis grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{/Cu}$ yang diteliti oleh Wibowo (2006) memiliki %IPCE (*Induce Photon to Current Efficiency*) 73,8 % lebih tinggi daripada lapis tipis semikonduktor grafit/ $\text{TiO}_2\text{/Cu}$ yang diteliti oleh Handayani (2006).

Reaksi degradasi akan menyebabkan perubahan struktur molekul zat warna karena terdegradasi oleh material semikonduktor. Struktur molekul dari senyawa hasil degradasi akan lebih sederhana. Dalam beberapa kasus bahkan semikonduktor mampu mendegradasi sampai mineralisasi komplet senyawa-senyawa organik, misalnya oksidasi hidrokarbon terklorinasi menjadi CO_2 dan H_2O oleh TiO_2 dengan adanya foton. Perubahan struktur molekul zat warna ditandai dengan penghilangan gugus – gugus fungsi dari *Remazol Yellow FG* setelah terdegradasi.

C. Hipotesis

1. Metode fotoelektrodegradasi lebih efisien untuk mendegradasi zat warna *Remazol Yellow FG* dibandingkan metode fotodegradasi maupun elektrodegradasi.
2. Penempelan logam Cu dapat meningkatkan efisiensi relatif degradasi zat warna *Remazol Yellow FG*.
3. Semikonduktor lapis tipis komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ dapat meningkatkan efisiensi relatif degradasi zat warna *Remazol Yellow FG* dibandingkan dengan semikonduktor lapis tipis TiO_2 .
4. Terjadi perubahan gugus – gugus fungsi zat warna *Remazol Yellow FG* karena proses degradasi.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen secara kualitatif dan kuantitatif. Penelitian tersebut adalah aplikasi semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂, grafit/TiO₂/Cu, grafit/komposit TiO₂-SiO₂ dan grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu pada degradasi zat warna *Remazol Yellow FG*.

B. Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Pemotongan grafit dilakukan di Laboratorium Lapis Tipis Jurusan Fisika Universitas Gadjah Mada, sintesis material semikonduktor dilakukan di Laboratorium Kimia Dasar F MIPA UNS, analisa XRD dilakukan di Sub Lab. Fisika Laboratorium Pusat F MIPA UNS, proses degradasi dilakukan di Sub Lab. Kimia Laboratorium Pusat F MIPA UNS, dan analisa FT – IR dilakukan di Laboratorium Instrumen Terpadu UII. Penelitian dilakukan dari bulan Mei 2006 – Oktober 2006.

C. Alat dan Bahan

2. Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- a. Gelas Beker dari polypropilena,
- b. Furnace (*Thermolyne* 48000),
- c. Lampu UV 6 W (*9815-series*),
- d. Empat set sel fotoelektrodegradasi,
- e. Stirer Hot Plate (model 4658),
- f. Stirer magnetic,
- g. Kawat platina,
- h. Spektrofotometer X– ray Diffraction (*Shimadzu* 6000),
- i. Inkubator (*Selecta Hot Cold-M*),
- j. Spektrofotometer UV-Vis (*Single Beam Spectronic* 21 D),
- k. Satu set alat elektrodeposisi (*Analytic Analyzer Electrolysis Fanaco AES-2D*),

- l. Spektroskopi FT-IR (*Thermo nicolet AVATAR 360*),
- m. Shaker rotator (*model VRN-200*)
- n. Desikator,
- o. Neraca analitis *Sartorius BP 110* (maksimum 110 g; minimum 0,001 g),
- p. Luxmeter (*Walklab digital LSI technology trans instruments*),
- q. Alat – alat gelas.

3. Bahan

- a. Batang grafit,
- b. Titanium(IV) klorida (TiCl_4) p.a. (Merck),
- c. CTABr p.a (Merck),
- d. Asam klorida 37% p.a. (Merck),
- e. *Deionized water*,
- f. Akuades,
- g. Na_2SiO_3 p.a. (Merck),
- h. Metanol absolute (Merck),
- i. Isobutanol p.a (Merck),
- j. Zat warna *Remazol Yellow FG* (dibeli dari pasaran dan langsung digunakan tanpa pemurnian lebih lanjut),
- k. Karbon aktif p.a (Merck),
- l. NH_4OH p.a (Merck),
- m. CuSO_4 p.a (Merck),
- n. KCl p.a (Merck),
- o. Sampel limbah zat warna *Remazol Yellow FG* pabrik batik,
- p. Kertas karbon,
- q. Pipa kapiler dan kapas.

D. Prosedur Penelitian

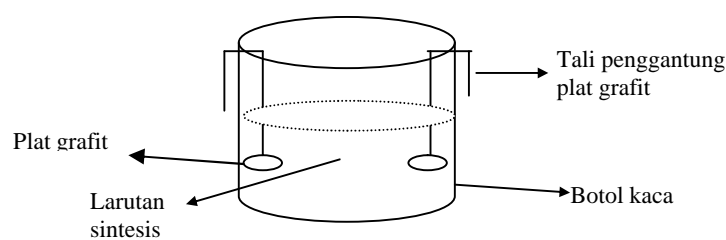
1. Sintesis Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/TiO₂ dan Semikonduktor Grafit/komposit TiO₂-SiO₂

a. Sintesis Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/TiO₂ (mengacu penelitian Rahmawati dkk, 2006)

Larutan sintesis dibuat dengan melarutkan 1,109 mL TiCl₄ ke dalam 100 mL HCl 1 M kemudian ditambahkan CTABr 0,583 gram ke dalam larutan sehingga menghasilkan konsentrasi CTABr $16 \cdot 10^{-3}$ M. Larutan diaduk selama 2 menit pada temperatur kamar, kemudian dibiarkan dulu selama 5 menit untuk menstabilkan antar muka udara/air.

Plat grafit yang telah dikaitkan dengan tali penggantung dicelupkan pada botol yang telah terisi sel sintesis (Gambar 12), kemudian sel sintesis dimasukkan ke dalam inkubator pada temperatur 60°C. Proses pembentukan lapisan dilakukan selama 4 hari.

Plat grafit yang sudah terlapisi lapisan sintesis diambil dan dicuci dengan *deionized water*, kemudian dikalsinasi dalam furnace dengan pemanasan pada temperatur 450°C selama 4 jam. Bagan prosedur kerja sintesis grafit /TiO₂ ditunjukkan oleh Lampiran 1.



Gambar 12. Desain sel sintesis grafit /TiO₂ dengan metode *chemical bath deposition* (Rahmawati dkk, 2006)

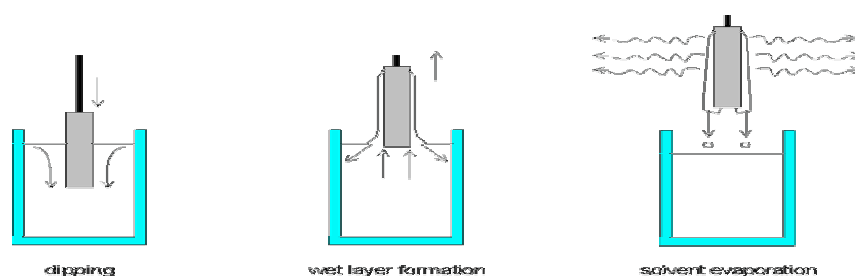
b. Sintesis Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/komposit TiO₂-SiO₂ (Nugraheni, 2006)

Sebanyak 6,2 mL Na₂SiO₃ dilarutkan dalam 20 mL methanol. Dalam campuran tersebut ditambahkan 2,7 mL HCl pekat dan 0,320 gram CTABr sehingga menghasilkan konsentrasi CTABr $16 \cdot 10^{-3}$ M (larutan A). Pada tempat

yang berbeda juga dilarutkan 2,9 mL TiCl_4 dalam 10 mL metanol dengan ditambahkan pengompleks isobutanol sebanyak 10 mL untuk mengurangi kecepatan hidrolisis dari TiCl_4 (larutan B).

Larutan B sedikit demi sedikit ditambahkan ke dalam larutan A yang sedang direfluks sambil diaduk menggunakan *stirer magnetic* sampai homogen dengan menjaga temperatur 70°C . Setelah Larutan B habis, refluks dihentikan dan campuran ditutup rapat kemudian diaduk selama 3 hari. Setelah menjadi gel ditambahkan NH_4OH sebanyak 4,12 mL dan diaduk disertai pemanasan pada temperatur 70°C selama 1 jam. Setelah 1 jam larutan ditambahkan akuades 5,9 mL dan diaduk selama 5 menit. Larutan gel dengan pH netral dioven pada temperatur 120°C selama 1 hari. Serbuk $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ yang terbentuk *difurnace* dengan temperatur 1100°C .

Semikonduktor lapis tipis grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ dibuat dengan mendeposisikan komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ pada plat grafit dengan metode *dip coating*. Plat grafit dikalsinasi pada temperatur 400°C selama 4 jam untuk menghilangkan kandungan parafin. Deposisi dilakukan dengan melarutkan 0,2 gram komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ dalam 25 mL metanol untuk dua plat grafit. Plat grafit dipanaskan kemudian dicelupkan ke dalam larutan komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$, dilakukan perulangan setiap 5 menit selama 18 jam. Cara pelapisan dengan metode *dip coating* ditunjukkan oleh Gambar 13.

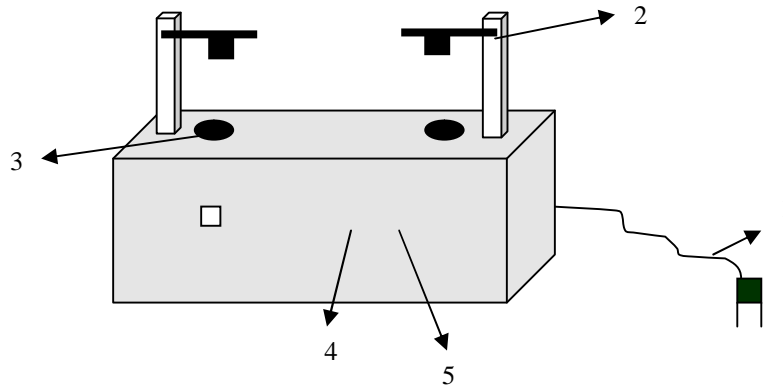


Gambar 13. Tahapan proses *dip coating* (Schmidt dan Mennig, 2000)

Plat grafit yang sudah terlapisi lapisan sintesis diambil dan dicuci dengan *deionized water*, kemudian dikalsinasi dalam *furnace* dengan pemanasan pada temperatur 110°C selama 4 jam. Bagan prosedur kerja sintesis grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ditunjukkan oleh Lampiran 2.

2. Metal Surface Modification (Handayani, 2006; Wibowo, 2006)

Modifikasi permukaan dengan penempelan logam dilakukan dengan metode elektrodposisi pada arus terkontrol. Setting alat elektrodposisi seperti terlihat pada Gambar 14 :



Gambar 14. Setting alat elektrodposisi (Handayani, 2006; Wibowo, 2006)

Keterangan : 1. saklar 2. klem elektroda 3. tempat sampel 4. tombol pengatur potensial listrik (untuk voltase terkontrol)/arus (untuk arus terkontrol) 5. tombol temperatur 6. tombol pengaduk magnetik

Cu dideposisikan dari larutan elektrolit CuSO_4 0,4 M. Material semikonduktor lapis tipis grafit/ TiO_2 dan grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ hasil sintesis dipakai sebagai katoda dan batang grafit sebagai anoda. Elektrodposisi dilakukan selama 30 menit dengan arus terkontrol 0,030 A pada grafit/ TiO_2 dan 0,014 A pada grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$. Setelah proses elektrodposisi selesai, grafit/ $\text{TiO}_2\text{/Cu}$ dan grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ dianginkan-anginkan supaya kering.

Proses gravimetri dilakukan pada semikonduktor lapis tipis grafit/ $\text{TiO}_2\text{/Cu}$ dan grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{/Cu}$ hasil elektrodposisi untuk mengetahui berat logam Cu yang tertempel. Proses gravimetri dilakukan dengan cara grafit/ $\text{TiO}_2\text{/Cu}$ dan grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{/Cu}$ hasil elektrodposisi dipanaskan dalam oven pada suhu 110°C selama ± 15 menit, kemudian didiamkan dalam desikator selama ± 30 menit untuk menghilangkan air pada permukaannya dan setelah itu ditimbang. Langkah ini dilakukan 2 kali hingga diperoleh berat tetap (dengan selisih berat maksimal $\pm 0,002$ g).

3. Aplikasi Material Semikonduktor Grafit/TiO₂, Grafit/TiO₂/Cu dan Grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu Hasil Sintesis untuk Degradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG*

a. Penentuan Panjang Gelombang Maksimum Larutan *Remazol Yellow FG*

Larutan zat warna *Remazol Yellow FG* dilarutkan dalam air hingga konsentrasi 25 ppm. Larutan zat warna diambil 10 mL dimasukkan ke dalam kuvet untuk diukur absorbansinya menggunakan Spektrofotometer UV-Vis pada masing – masing panjang gelombang 200 nm – 600 nm, sehingga diperoleh harga panjang gelombang maksimum larutan *Remazol Yellow FG*. Bagan prosedur kerja aplikasi material semikonduktor ditunjukkan oleh Lampiran 3.

b. Pembuatan Kurva Standar *Remazol Yellow FG*

Larutan zat warna *Remazol Yellow FG* dengan konsentrasi 5 ppm, 10 ppm, 15 ppm, 20 ppm, dan 25 ppm dilakukan pengukuran absorbansi pada panjang gelombang maksimumnya. Dari data yang diperoleh dibuat kurva standar larutan zat warna *Remazol Yellow FG*. Pembuatan kurva standar dilakukan setiap pengantian larutan induk.

c. Absorpsi Material pada Larutan *Remazol Yellow FG*

Larutan zat warna *Remazol Yellow FG* sebanyak 15 mL dengan konsentrasi 20 ppm dimasukkan pada sel uji dan diberi material semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂ hasil sintesis. Sel uji diisolasi dari cahaya (dilakukan pada kondisi tanpa sinar). Pengukuran absorbansi larutan zat warna *Remazol Yellow FG* dilakukan setiap 20 menit selama 160 menit.

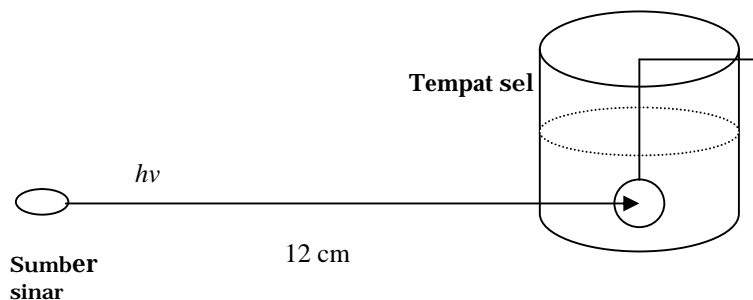
Sebagai analisa pengaruh modifikasi permukaan semikonduktor terhadap efektivitas fotokatalisis zat warna, maka prosedur diatas juga dilakukan terhadap grafit/TiO₂/Cu, grafit/komposit TiO₂-SiO₂ dan grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu.

d. Fotodegradasi Material pada Larutan *Remazol Yellow FG*

Larutan zat warna *Remazol Yellow FG* sebanyak 15 mL dengan konsentrasi 20 ppm dimasukkan pada sel fotodegradasi dan diberi material semikonduktor lapis tipis Grafit/TiO₂ hasil sintesis. Sel uji disinari dengan lampu UV 6 W pada $\lambda = 254$ nm (jarak dengan sel sejauh 12 cm) dan sel diisolasi dari pengaruh sinar

lain dengan dimasukkan dalam kotak tertutup. Penyinaran dilakukan selama 160 menit, kemudian larutan diambil setiap 20 menit, dan diukur absorbansinya.

Prosedur yang sama juga dilakukan pada material semikonduktor lapis tipis grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$, grafit/ TiO_2/Cu dan grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{Cu}$ hasil sintesis. Setting alat fotodegradasi terlihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Setting alat fotodegradasi

e. Elektrodegradasi Material pada Larutan *Remazol Yellow FG*

Semikonduktor lapis tipis grafit/ TiO_2 hasil sintesis (digunakan sebagai anoda dari sel elektrodegradasi) dicelupkan pada 15 mL larutan zat warna *Remazol Yellow FG* dengan konsentrasi 20 ppm. Setengah sel lainnya berisi 15 mL larutan KCl 0,1 M yang berfungsi sebagai katoda. Kedua sel dihubungkan dengan suatu jembatan garam KCl , kemudian dialirkan arus dari suatu *power supply* (500 mA, 12 V). Sel diisolasi dari pengaruh sinar lain dengan dimasukkan dalam kotak tertutup. Pengukuran absorbansi larutan zat warna *Remazol Yellow FG* dilakukan setiap 20 menit selama 240 menit. alat untuk elektrodegradasi tampak pada Gambar 16.

Prosedur diatas juga dilakukan terhadap grafit/ TiO_2/Cu , grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ dan grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{Cu}$ sebagai analisa pengaruh modifikasi permukaan semikonduktor terhadap efektivitas degradasi zat warna.

f. Fotoelektrodegradasi Material pada Larutan *Remazol Yellow FG* Menggunakan Lampu UV

Semikonduktor lapis tipis grafit/ TiO_2 hasil sintesis (digunakan sebagai anoda dari sel fotoelektrodegradasi), dicelupkan pada 15 mL larutan zat warna

Remazol Yellow FG dengan konsentrasi 20 ppm. Setengah sel lainnya berisi 15 mL larutan KCl 0,1 M yang berfungsi sebagai katoda. kedua sel dihubungkan dengan suatu jembatan garam KCl, kemudian dialirkan arus dari suatu *power supply* (500 mA, 12 V). Sel uji disinari dengan lampu UV 6 W pada $\lambda = 254$ nm, dan sel diisolasi dari pengaruh sinar lain dengan dimasukkan dalam kotak tertutup. Setting alat fotoelektrodegradasi seperti Gambar 16 yang disinari lampu UV pada jarak 12 cm dari sel degradasi. Pengukuran absorbansi larutan zat warna *Remazol Yellow FG* dilakukan setiap 20 menit selama 240 menit.

Prosedur diatas juga dilakukan terhadap grafit/TiO₂/Cu, grafit/komposit TiO₂-SiO₂ dan grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu sebagai analisa pengaruh modifikasi permukaan semikonduktor terhadap efektivitas degradasi zat warna.

g. Fotoelektrodegradasi Material pada Larutan *Remazol Yellow FG* dengan Sinar Matahari

Semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂ hasil sintesis (digunakan sebagai anoda sel fotoelektrodegradasi) dicelupkan pada 15 mL larutan zat warna *Remazol Yellow FG* dengan konsentrasi 20 ppm. Posisi permukaan semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂ yang luas menghadap ke atas agar terkena sinar matahari secara langsung. Setengah sel lainnya berisi 15 mL larutan KCl 0,1 M yang berfungsi sebagai katoda. Kedua sel dihubungkan dengan suatu jembatan garam KCl, kemudian dialirkan arus dari suatu *power supply* (500 mA, 12 V). Setting alat seperti Gambar 16, hanya sel uji ditaruh di bawah sinar matahari langsung. Pengukuran absorbansi larutan zat warna *Remazol Yellow FG* dilakukan setiap 20 menit selama 240 menit.

Prosedur diatas juga dilakukan terhadap grafit/TiO₂/Cu, grafit/komposit TiO₂-SiO₂ dan grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu sebagai analisa pengaruh modifikasi permukaan semikonduktor terhadap efektivitas degradasi zat warna.

h. Pengukuran Intensitas Sinar Matahari

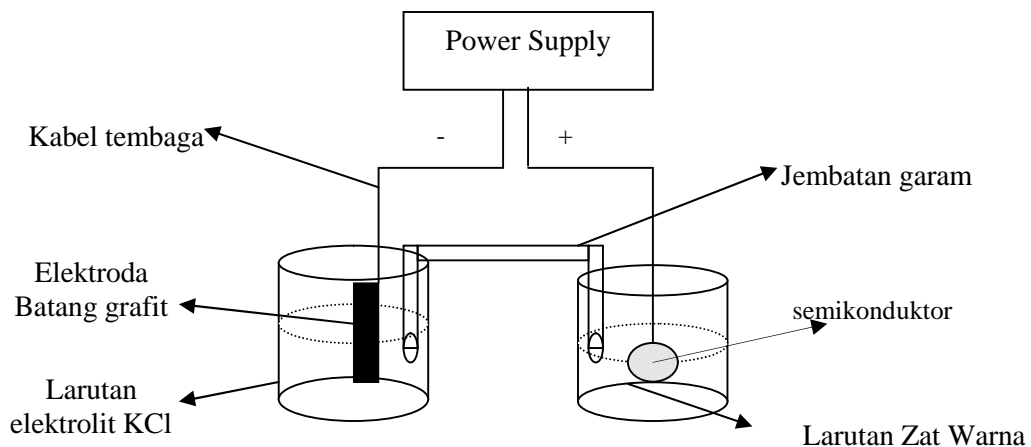
Pengukuran intensitas matahari dilakukan menggunakan luxmeter. Pengukuran dilakukan pada pukul 9.30 WIB (waktu awal degradasi), pukul 11.00 WIB (pertengahan waktu degradasi), dan pada pukul 14.00 WIB (akhir waktu degradasi).

i. Fotoelektrodegradasi Sempurna Zat Warna dan Limbah Zat Warna *Remazol Yellow FG* oleh Semikonduktor Grafit/ TiO_2/Cu

Tiga keping semikonduktor lapis tipis grafit/ TiO_2/Cu (semikonduktor yang paling efektif) hasil sintesis digunakan sebagai anoda sel fotoelektrodegradasi, dicelupkan pada 15 mL larutan zat warna maupun limbah zat warna *Remazol Yellow FG*. Setengah sel lainnya berisi 15 mL larutan KCl 0,1 M yang berfungsi sebagai katoda. Kedua sel dihubungkan dengan suatu jembatan garam KCl. Sel diisolasi dari pengaruh sinar lain dengan dimasukkan dalam kotak tertutup kemudian dialirkan arus dari suatu *power supply* (500 mA, 12 V). Sel disinari dengan lampu UV 6 W pada panjang gelombang daerah UV ($\lambda = 254 \text{ nm}$) dan sinar matahari sebagai aplikasi praktis. Setting alat seperti Gambar 16 yang disinari lampu UV atau sinar matahari. Pengukuran absorbansi larutan zat warna *Remazol Yellow FG* dilakukan setiap 20 menit sampai diperkirakan telah terdegradasi sempurna (absorbansi mendekati nol). Kemudian diidentifikasi gugus fungsinya berdasarkan spektra IR.

j. Penentuan Perubahan Gugus Fungsi Hasil Degradasi Menggunakan Semikonduktor grafit/ TiO_2/Cu

Dalam larutan zat warna dan limbah *Remazol Yellow FG* yang diperkirakan telah terdegradasi sempurna menggunakan semikonduktor grafit/ TiO_2/Cu (semikonduktor yang paling efektif), dimasukkan dalam 0,1 g karbon aktif dan *dishaker* selama 30 menit. Pemisahan karbon aktif dari larutan dilakukan dengan penyaringan, kemudian residu (karbon aktif setelah penyerapan) dikeringkan pada 105°C selama ± 15 menit untuk menghilangkan molekul-molekul air dan dilanjutkan dengan analisis gugus fungsi menggunakan spektroskopi FT-IR. Sebagai acuan terjadi perubahan gugus fungsi maka perlakuan serupa dilakukan pada larutan zat warna yang belum didegradasi.



Gambar 16. Setting alat elektrodegradasi/ fotoelektrodegradasi

E. Teknik Pengumpulan Data

1. Pengumpulan Data

Aplikasi material semikonduktor untuk degradasi zat warna *Remazol Yellow FG* dengan variabel bebas : pertama, metode degradasi yang meliputi fotodegradasi, elektrodegradasi dan fotoelektrodegradasi; kedua, komposisi material semikonduktor meliputi grafit/TiO₂, grafit/komposit TiO₂-SiO₂, grafit/TiO₂/Cu, dan grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu. Data diperoleh dengan mencatat perubahan absorbansi zat warna sebelum dan sesudah dilakukan proses degradasi. Kemudian menginterpolasikanya ke kurva kalibrasi (absorbansi versus konsentrasi), maka konsentrasi sampel dapat ditentukan dan dibuat kurva waktu versus konsentrasi. Variabel terikat pada penelitian ini adalah efisiensi penurunan konsentrasi pada 60 menit pertama degradasi (η). Efisiensi penurunan konsentrasi pada 60 menit pertama degradasi menggunakan Persamaan 8 :

$$\eta = \frac{C_0 - C_{60}}{C_0} \dots\dots\dots(8)$$

Dimana,

η = efisiensi penurunan konsentrasi pada 60 menit pertama degradasi

C_0 = konsentrasi awal sebelum degradasi

C_{60} = konsentrasi pada 60 menit pertama degradasi.

Perubahan gugus fungsi zat warna akibat degradasi dapat dilihat dari spektra FT-IR zat warna *Remazol Yellow FG* sebelum dan sesudah terdegradasi setelah diserap dengan karbon aktif.

2. Analisis Data

Analisis data aplikasi material semikonduktor untuk degradasi zat warna *Remazol Yellow FG* dilakukan dengan menentukan efisiensi relatif pada 60 menit pertama degradasi. Efisiensi relatif pada 60 menit pertama degradasi dapat ditentukan menggunakan Persamaan 9 :

$$\eta_{60} = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1} \dots\dots\dots(9)$$

Dimana,

η_{60} = efisiensi relatif pada 60 menit pertama degradasi

η_1 = efisiensi yang lebih besar

η_2 = efisiensi yang lebih kecil.

Metode fotoelektrodegradasi lebih efisien untuk mendegradasi zat warna *Remazol Yellow FG* apabila memiliki η_{60} lebih tinggi dibandingkan fotodegradasi maupun elektrodegradasi. Penempelan logam Cu pada grafit/TiO₂/Cu dan grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu lebih efisien apabila memiliki η_{60} lebih tinggi dibandingkan grafit/TiO₂, dan grafit/komposit TiO₂-SiO₂. Pembuatan semikonduktor lapis tipis komposit TiO₂-SiO₂ lebih efisien apabila memiliki η_{60} lebih tinggi dibandingkan grafit/TiO₂.

Sedangkan untuk analisis perubahan gugus fungsi zat warna akibat degradasi menggunakan spektroskopi FT-IR. Perubahan gugus fungsi zat warna *Remazol Yellow FG* menunjukkan adanya perubahan struktur molekul zat warna karena terdegradasi oleh material semikonduktor.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Sintesis Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/TiO₂, Grafit/TiO₂/Cu, Grafit/Komposit TiO₂-SiO₂ dan Grafit/Komposit TiO₂-SiO₂/Cu

Sintesis lapis tipis semikonduktor grafit/TiO₂ pada penelitian ini mengacu pada penelitian Rahmawati dkk (2006) yaitu sintesis semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂ dengan membuat larutan sintesis yang terdiri dari HCl 1 M : TiCl₄ 0,1 M dan surfaktan CTABr $16 \cdot 10^{-3}$ M menggunakan metode *chemical bath deposition* dengan waktu perendaman selama 4 hari dan pemanasan yang kontinyu pada suhu 60° C. Konsentrasi CTABr $16 \cdot 10^{-3}$ M dan waktu perendaman 4 hari ini merupakan kondisi optimal pada deposisi TiO₂. Hal ini ditunjukkan dari %IPCE paling tinggi sebesar 3,261 %.

Sintesis semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂/Cu sesuai dengan penelitian yang dilakukan Handayani (2006). Penempelan logam Cu pada permukaan semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂ dilakukan dengan proses elektrodposisi. Arus elektrodposisi yang digunakan sebesar 0,030 A, berdasarkan %IPCE maksimum terdapat pada grafit/TiO₂/Cu dengan arus elektrodposisi 0,030 A yaitu sebesar $14,208 \cdot 10^{-2}$ %.

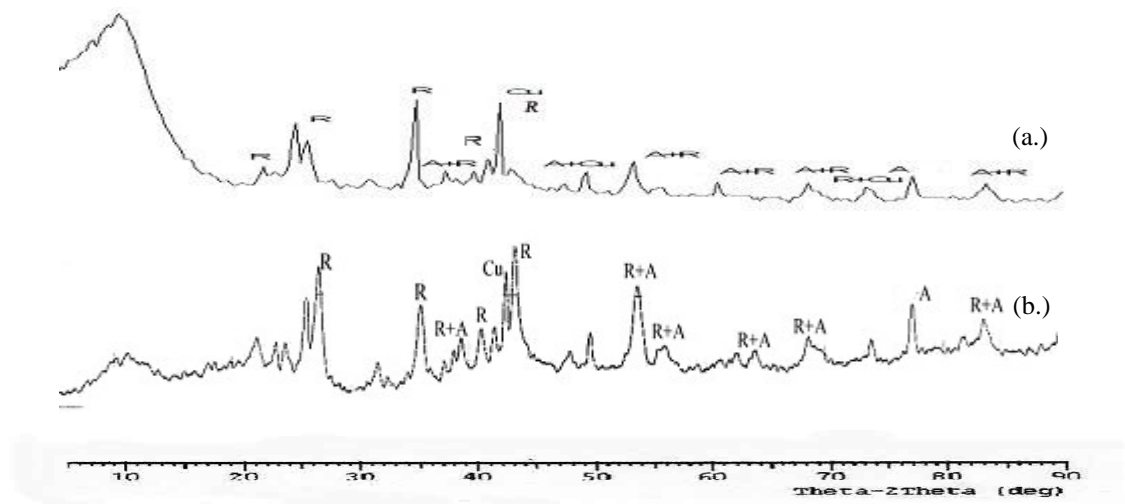
Sintesis semikonduktor lapis tipis grafit/komposit TiO₂-SiO₂ berdasar pada penelitian yang telah dilakukan Nugraheni (2006) yang melakukan sintesis material komposit TiO₂-SiO₂ dengan bahan awal SiO₂ menggunakan Na₂SiO₃ yang dilarutkan dalam campuran metanol, HCl 37%, H₂O dan CTABr. Sedangkan bahan awal TiO₂ menggunakan TiCl₄ dalam campuran metanol dan isobutanol sebagai pengompleks untuk mengurangi kecepatan hidrolisis dari TiCl₄. Serbuk komposit TiO₂-SiO₂ hasil sintesis dikalsinasi secara bertahap dengan kecepatan pemanasan 5°C/menit pada berbagai variasi temperatur. Material komposit TiO₂-SiO₂ tersebut kemudian dideposisikan pada grafit dengan menggunakan metode *dip coating*. Hasil pengukuran % IPCE grafit/komposit TiO₂-SiO₂ pada variasi

temperatur diperoleh % IPCE maksimum sebesar $5,99 \times 10^{-2}$ % pada temperatur kalsinasi 1100 °C.

Sintesis semikonduktor lapis tipis grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{Cu}$ dilakukan sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Wibowo (2006). Penempelan logam Cu pada permukaan semikonduktor lapis tipis grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{Cu}$ dengan proses elektrodposisi. Arus elektrodposisi yang digunakan sebesar 0,014 A, berdasarkan %IPCE maksimum terdapat pada grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{Cu}$ dengan arus elektrodposisi 0,014 A sebesar $45,5 \cdot 10^{-2}$ %.

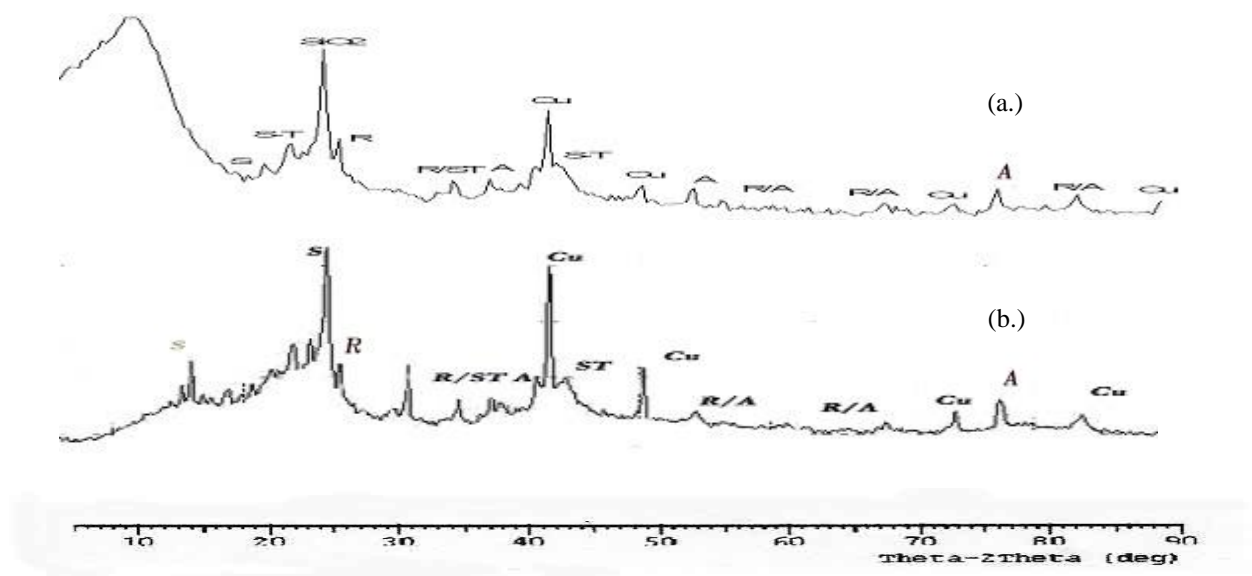
Karakterisasi menggunakan difraksi sinar X berguna untuk mengetahui kristalinitas dari semikonduktor yang telah dibuat dan mengetahui adanya logam Cu yang terdposisi pada grafit/ TiO_2 dan grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$. Analisis menggunakan radiasi Cu $K\alpha$ ($\lambda = 1,5418$ angstrom) dilakukan dengan membandingkan nilai d (d *spacing*) dari puncak-puncak kristalin yang muncul dalam spektra dengan puncak-puncak standar JCPDS (ditunjukkan pada Lampiran 6).

Pola difraksi grafit/ TiO_2/Cu dan grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{Cu}$ ditunjukkan pada Gambar 17 dan Gambar 18. Pola difraksi grafit/ TiO_2/Cu dan grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{Cu}$ lengkap ditunjukkan pada Lampiran 4 dan Lampiran 5.



Gambar 17. (a.) Pola difraksi grafit/ TiO_2/Cu hasil sintesis,
(b.) Pola difraksi grafit/ TiO_2/Cu Handayani (2006)

Keterangan : R : TiO_2 Rutil A : TiO_2 Anatase S : SiO_2
ST : $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ Cu : Logam Cu



Gambar 18. (a.) Pola difraksi grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{/Cu}$ hasil sintesis,
(b.) Pola difraksi grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{/Cu}$ Wibowo (2006)

Perbandingan puncak – puncak difraksi XRD hasil sintesis dibandingkan dengan hasil sintesis Handayani (2006) dan Wibowo (2006) ditunjukkan oleh Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan puncak – puncak difraksi hasil sintesis dengan Handayani (2006) dan Wibowo (2006)

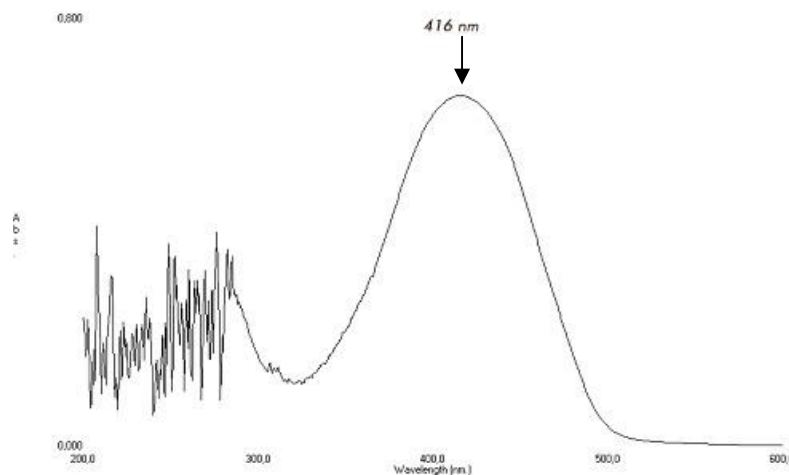
Puncak - puncak	grafit/ TiO_2 /Cu		grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{/Cu}$	
	hasil sintesis (2θ)	Handayani(2006) (2θ)	hasil sintesis (2θ)	Wibowo(2006) (2θ)
Rutil	27, 36, 43, 54, 56, 68	39, 41 , 43, 54, 56, 68, 69	27, 43, 44, 45, 77, 89	27, 43, 54, 73, 77
Anatase	39, 48, 54, 69 77	37, 38, 54, 77	38, 54, 77, 83	38, 54, 77, 83
SiO_2	-	-	25, 26	25, 26
$\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$	-	-	23, 36, 45	23
Logam Cu	43, 50, 73, 89	43, 50, 73, 89	43, 50, 74, 89	43, 50, 74, 89

Pada Tabel 2 terlihat bahwa semua fase pada material semikonduktor grafit/TiO₂/Cu hasil sintesis Handayani (2006) juga nampak pada material semikonduktor hasil sintesis pada penelitian ini. Material grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu hasil sintesis pada penelitian ini menunjukkan kesamaan fase dengan material grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu hasil sintesis Wibowo (2006). Material semikonduktor grafit/TiO₂/Cu hasil sintesis memiliki rasio anatase rutil sebesar 0,84, rasio anatase rutil Handayani (2006) sebesar 0,69 pada $2\theta = 43$ untuk rutil dan pada $2\theta = 77$ untuk anatase (perhitungan pada Tabel Lampiran 1). Material semikonduktor grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu memiliki rasio anatase rutil sebesar 0,585 sedangkan rasio anatase rutil hasil sintesis Wibowo (2006) sebesar 0,589 pada $2\theta = 77$ pada anatase dan $2\theta = 27$ pada rutil. Rasio TiO₂ anatase - SiO₂ pada $2\theta = 26$ sebesar 0,24 dan rasio anatase - SiO₂ hasil sintesis Wibowo (2006) sebesar 0,23. Ratio TiO₂ rutil - SiO₂ dengan $2\theta = 26$ sebesar 0,41 sedangkan pada Wibowo (2006) rasio TiO₂ rutil - SiO₂ sebesar 0,39 (perhitungan pada Tabel Lampiran 2).

Fase anatase dan rutil pada semikonduktor grafit/TiO₂/Cu hasil sintesis memiliki sistem kristal tetragonal dengan kisi kristal *body centered* pada anatase TiO₂ dan *primitive* pada rutil. Sistem kristal anatase dan rutil TiO₂ ini sesuai dengan sistem kristal anatase dan rutil yang terlihat pada Handayani (2006). Material semikonduktor grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu hasil sintesis memiliki sistem kristal yang sama dengan Wibowo (2006). Sistem kristal TiO₂-SiO₂ adalah tetragonal, SiO₂ adalah monoklinik *end centered*, TiO₂ anatase dan TiO₂ rutil adalah tetragonal dengan kisi kristal *body centered* pada anatase dan *primitive* pada rutil. Sistem kristal Cu pada semikonduktor grafit/TiO₂/Cu maupun grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu sesuai standar JCPDS adalah *cubic face centered*. Keberadaan logam Cu pada semikonduktor grafit/TiO₂/Cu maupun grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu muncul pada bidang kristal (111), (200), (220), dan (311). Bidang kristal Cu yang nampak pada hasil sintesis ini sama dengan bidang kristal Cu pada Handayani (2006) maupun Wibowo (2006).

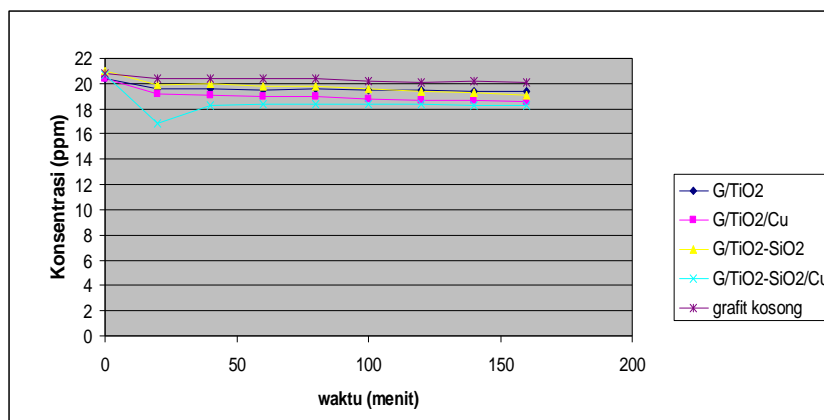
B. Degradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG*

Berdasarkan hasil pengukuran absorbansi larutan *Remazol Yellow FG* pada panjang gelombang 200 - 600 nm diperoleh puncak dominan pada 416 nm, seperti terlihat pada Gambar 19. Puncak tersebut merupakan panjang gelombang spesifik untuk absorbansi warna kuning, maka pengukuran absorbansi pada prosedur kerja selanjutnya dilakukan pada panjang gelombang 416 nm.



Gambar 19. Kurva penentuan panjang gelombang maksimum *Remazol Yellow FG*

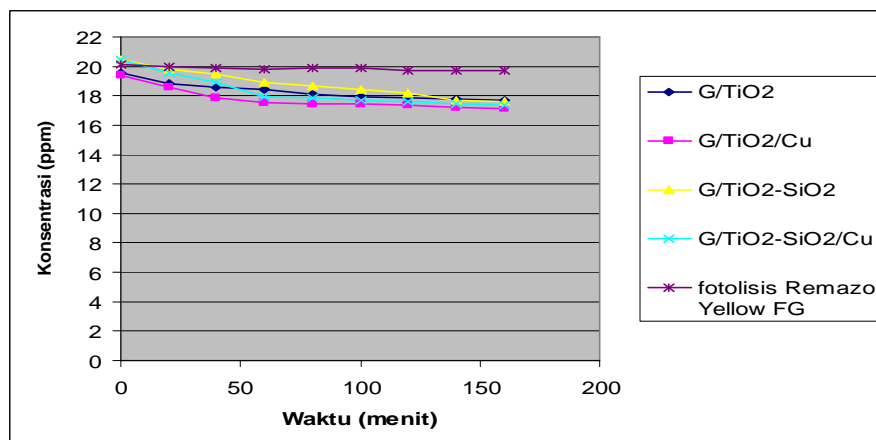
Material semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂, grafit/TiO₂/Cu, grafit/komposit TiO₂-SiO₂, maupun grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu yang bersubtrat grafit mempunyai sifat sebagai absorben. Grafik penurunan konsentrasi *Remazol Yellow FG* dengan perlakuan tanpa pemberian arus dan tanpa sinar (absorpsi) yang bertujuan untuk melihat pengaruh absorpsi material semikonduktor pada degradasi *Remazol Yellow FG* (sebagai kontrol) ditunjukkan oleh Gambar 20. Data penurunan absorbansi dan interpolasinya ke konsentrasi ditunjukkan pada Lampiran 9 dan grafik kurva standarnya pada Lampiran 8.



Gambar 20. Grafik Penurunan konsentrasi *Remazol Yellow FG* tanpa arus dan tanpa sinar (absorpsi) oleh semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂, grafit/TiO₂/Cu, grafit/komposit TiO₂-SiO₂, maupun grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu

Pada Gambar 20 terlihat adanya penurunan konsentrasi *Remazol Yellow FG* dengan absorpsi material semikonduktor grafit/TiO₂, grafit/TiO₂/Cu, grafit/komposit TiO₂-SiO₂, maupun grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu tidak terlalu berbeda, mungkin karena ukuran porinya hampir sama yaitu 5 – 10 µm dan material semikonduktor lapis tipis hasil sintesis rata – rata hanya memiliki berat sekitar 0,003 ± 0,001 g (Handayani, 2006; Wibowo, 2006). Absorpsi grafit kosong (tanpa semikonduktor) digunakan sebagai kontrol. Terlihat bahwa absorpsi *Remazol Yellow FG* lebih besar dengan semikonduktor dibandingkan tanpa semikonduktor.

Semikonduktor TiO₂ mempunyai sifat fotokatalitik yang dapat digunakan sebagai pendegradasi zat warna. Degradasi fotokatalisis (fotodegradasi) zat warna *Remazol Yellow FG* dilakukan dengan material semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂, grafit/TiO₂/Cu, grafit/komposit TiO₂-SiO₂, maupun grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu. Data penurunan absorbansi dan interpolasinya ke konsentrasi ditunjukkan pada Lampiran 10. Grafik hasil pengukuran fotodegradasi *Remazol Yellow FG* dapat terlihat pada Gambar 21.



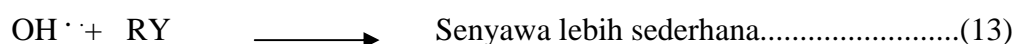
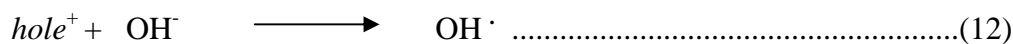
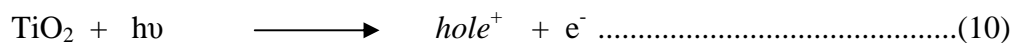
Gambar 21. Grafik fotodegradasi *Remazol Yellow FG* oleh semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂, grafit/TiO₂/Cu, grafit/komposit TiO₂-SiO₂, maupun grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu

Pada Gambar 21 terlihat bahwa terjadi pengurangan konsentrasi dari *Remazol Yellow FG*. Hal itu disebabkan adanya reaksi reduksi-oksidasi antara permukaan semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂, grafit/TiO₂/Cu, grafit/komposit TiO₂-SiO₂, maupun grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu dengan larutan zat warna *Remazol yellow FG*. Fotolisis larutan zat warna *Remazol Yellow FG* dengan lampu UV digunakan sebagai kontrol percobaan tanpa menggunakan material semikonduktor. Penurunan konsentrasi *Remazol Yellow FG* menggunakan semikonduktor lebih besar dibandingkan hanya disinari saja tanpa menggunakan semikonduktor.

Penyinaran lampu UV dengan panjang gelombang pendek (dibawah 390 nm) ini mengiluminasi permukaan semikonduktor lapis tipis grafit, maka elektron (e^-) pada pita valensi akan pindah ke pita konduksi, dan meninggalkan lubang positif (*hole*, disingkat sebagai h^+) pada pita valensi. Sebagian pasangan e^- dan h^+ ini akan berekombinasi kembali, baik di permukaan atau didalam *bulk* partikel. Sementara itu sebagian pasangan e^- dan h^+ dapat bertahan sampai pada permukaan semikonduktor. Dimana h^+ dapat menginisiasi reaksi oksidasi dan dilain pihak e^- akan menginisiasi reaksi reduksi zat kimia yang ada disekitar permukaan semikonduktor (Linsebigler, *et al.*,1995).

Pada prinsipnya, reaksi oksidasi pada permukaan semikonduktor dapat berlangsung melalui donasi elektron dari substrat ke h^+ (menghasilkan radikal pada substrat yang akan menginisiasi reaksi berantai). Apabila potensial oksidasi yang dimiliki oleh h^+ pada pita valensi ini cukup besar untuk mengoksidasi air dan atau gugus hidroksil pada permukaan partikel maka akan menghasilkan radikal hidroksil. Radikal hidroksil adalah spesi pengoksidasi kuat yang memiliki potensial redoks sebesar 2,8 V (vs SHE). Potensial sebesar ini cukup kuat untuk mengoksidasi kebanyakan zat organik menjadi air, asam mineral, dan karbon dioksida (Gunlazuardi, 2001).

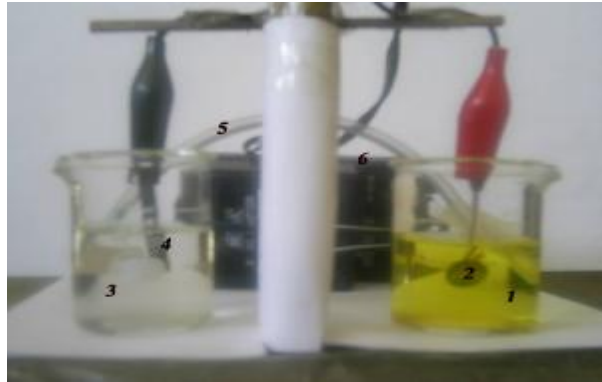
Menurut Yu, J.C. and L.Y.L. Chan (1998), proses fotodegradasi akan diawali dengan oksidasi ion OH^- dari H_2O membentuk radikal, setelah semikonduktor TiO_2 menyerap cahaya membentuk *hole*. Mekanisme reaksi yang diusulkan adalah sebagai berikut:



Semakin lama waktu yang digunakan, maka jumlah elektron tereksitasi semakin banyak, dan jumlah *Remazol Yellow FG* yang teroksidasi juga semakin besar.

Penggunaan substrat grafit pada material semikonduktor TiO_2 dan komposit TiO_2-SiO_2 yang memiliki sifat konduktif (mampu menghantarkan arus listrik) mempunyai keuntungan antara lain: pertama, memudahkan modifikasi penempelan logam Cu pada material semikonduktor dengan metode elektrodposisi (Handayani, 2006; Wibowo, 2006); Kedua, metode degradasi dapat dilakukan dengan bantuan aliran listrik (elektrodegradasi). Skema sel elektrodegradasi terdapat pada Gambar 22. Sel pertama berisi zat warna *Remazol Yellow FG* yang akan didegradasi yang terhubung dengan anoda, sedangkan sel kedua berisi larutan elektrolit KCl 0,1 M yang terhubung dengan katoda. Kedua sel dihubungkan dengan jembatan garam KCl. Digunakan larutan elektrolit KCl

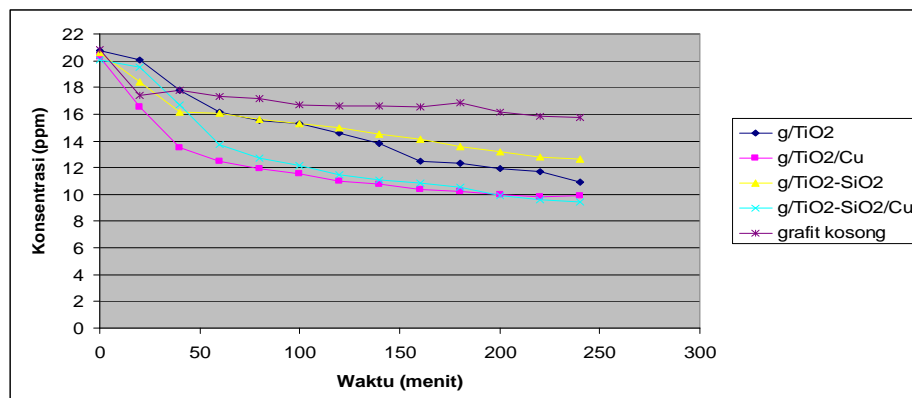
karena memiliki kecepatan difusi yang relatif sama untuk menghilangkan *junction potensial*. Material semikonduktor digunakan sebagai anoda dan batang grafit sebagai katoda.



Gambar 22. Gambar setting alat elektrodegradasi

Keterangan: (1) Larutan *Remazol Yellow FG*, (2) Semikonduktor, (3) Larutan KCl, (4) Batang grafit, (5) Jembatan garam, (6) adaptor

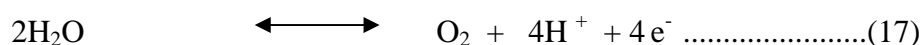
Grafik elektrodegradasi zat warna *Remazol Yellow FG* menggunakan material semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂, grafit/TiO₂/Cu, grafit/komposit TiO₂-SiO₂, maupun grafit/komposit TiO₂-SiO₂/ Cu dtunjukkan pada Gambar 23. Data penurunan absorbansi dan interpolasinya ke konsentrasi ditunjukkan pada Lampiran 11.



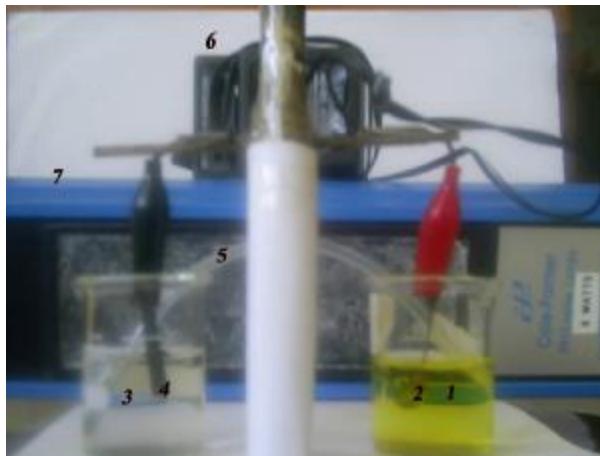
Gambar 23. Grafik elektrodegradasi *Remazol Yellow FG* oleh semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂, grafit/TiO₂/Cu, grafit/komposit TiO₂-SiO₂, maupun grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu

Pada Gambar 23 terlihat bahwa pemberian arus ternyata berpengaruh besar terhadap degradasi zat warna *Remazol Yellow FG* dimana terjadi penurunan konsentrasi *Remazol Yellow FG* yang cukup besar. Pemberian arus pada grafit kosong (grafit tanpa semikonduktor) digunakan sebagai kontrol.

Penambahan potensial luar pada lapis tipis TiO_2 akan menyebabkan pemisahan elektron tereksitasi dan *hole* dapat dipercepat. Potensial luar pada iluminasi TiO_2 tidak hanya dapat memisahkan elektron pada pita konduksi dari proses oksidasi, tetapi juga dapat mengurangi rekombinasi elektron dan *hole* dan memisahkan sisi oksidasi dan reduksi (He, *et al.*, 2003). Aplikasi pemberian potensial pada permukaan elektroda TiO_2 yang dicelupkan didalam air (larutan zat warna) mengurangi tingkat energi ferminya, dan karenanya menghasilkan pembentukan medan listrik didekat interface pada daerah yang disebut sebagai lapisan deplesi. Level fermi (E_f) merupakan level transisi yang tempatnya sedikit dibawah pita konduksi. Setiap elektron yang dipromosikan sebagai akibat tereksitasi oleh cahaya maupun oleh penambahan potensial luar di daerah lapisan deplesi akan dipercepat bergerak kedalam *bulk* material dan selanjutnya dialirkan ke elektroda grafit melalui sirkuit luar. Sebaliknya, h^+ yang dihasilkan oleh cahaya disekitar lapisan deplesi akan dipercepat bergerak ke permukaan dimana h^+ akan bergerak bebas sebelum berekombinasi didalam semikonduktor. Oleh karenanya, jelas bahwa medan listrik akan secara signifikan meningkatkan pemisahan muatan, sehingga meningkatkan pembentukan radikal hidroksil, suatu fenomena yang diberi nama *electric field enhancement effect* (efek peningkatan akibat medan listrik) (Gunlazuardi, 2001). Kemungkinan reaksi yang dapat terjadi pada sel elektrodegradasi sebagai berikut :



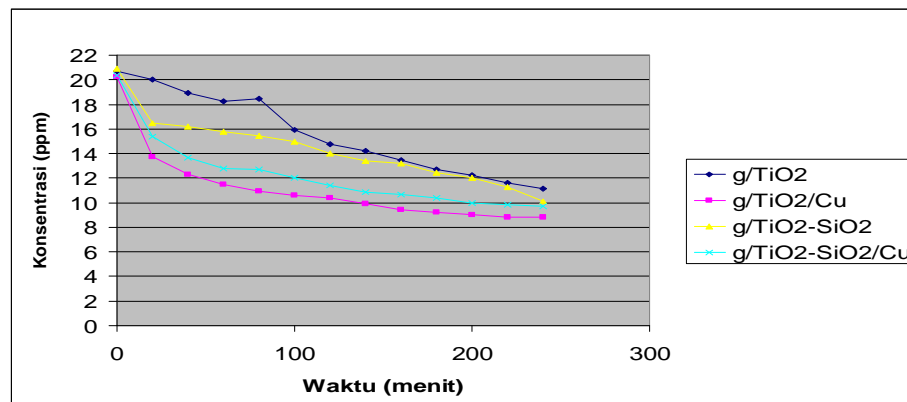
Metode fotodegradasi dan elektrodegradasi dapat dipadukan, sehingga diharapkan didapat metode degradasi yang lebih efektif. Setting alat untuk Sel fotoelektrodegradasi (Gambar 24) sama dengan setting alat untuk elektrodegradasi hanya diberi tambahan lampu UV 6 Watt, untuk menjaga agar kondisi sel dalam keadaan isotherm sehingga volume larutan tidak berkurang karena proses penguapan oleh panas dari filamen lampu dengan watt besar.



Gambar 24. Gambar setting alat fotoelektrodegradasi

Keterangan : (1) Larutan *Remazol Yellow FG*, (2) Semikonduktor, (3) Larutan KCl, (4) Batang grafit, (5) Jembatan garam, (6) adaptor, (7) lampu UV

Grafik fotoelektrodegradasi *Remazol Yellow FG* dengan lampu UV oleh semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂, grafit/TiO₂/Cu, grafit/komposit TiO₂-SiO₂, maupun grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu ditunjukkan pada Gambar 25. Data penurunan absorbansi dan interpolasinya ke konsentrasi ditunjukkan pada Lampiran 12.

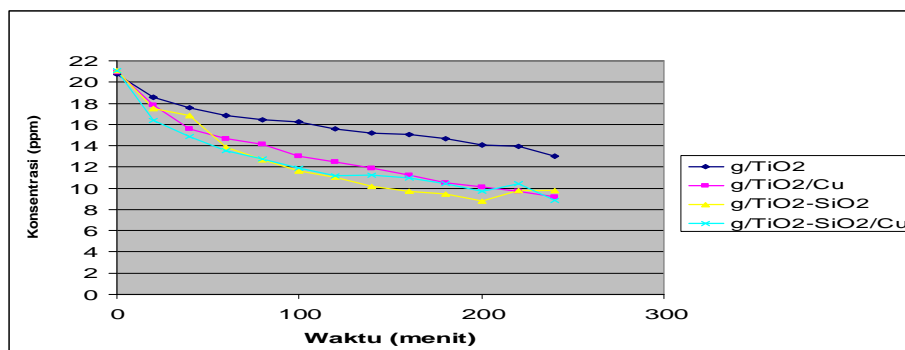


Gambar 25. Grafik fotoelektrodegradasi *Remazol Yellow FG* dengan lampu UV oleh semikonduktor lapis tipis grafit/TiO₂, grafit/TiO₂/Cu, grafit/komposit TiO₂-SiO₂, maupun grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu

Pada Gambar 25 terlihat bahwa penurunan konsentrasi *Remazol Yellow FG* menggunakan grafit/TiO₂/Cu dan grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu paling banyak dibandingkan dengan semikonduktor yang lain. Efisiensi relatif pada 60 menit pertama degradasi (η_{60}) menggunakan semikonduktor grafit/TiO₂/Cu dengan fotoelektrodegradasi sinar UV 71,21 % lebih tinggi dibandingkan grafit/TiO₂ (Perhitungan pada Lampiran 14). Sedangkan menggunakan semikonduktor grafit/komposit SiO₂-TiO₂/Cu dengan fotoelektrodegradasi sinar UV 33,25 % lebih tinggi dibandingkan dengan grafit/komposit SiO₂-TiO₂. Oleh karena itu penempelan logam Cu dapat meningkatkan efektivitas fotoelektrodegradasi zat warna *Remazol Yellow FG*.

Penempelan logam pada material semikonduktor grafit/TiO₂/Cu dan material semikonduktor grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu dapat meningkatkan produk fotokatalisis atau meningkatkan kecepatan reaksi fotokatalisis. Kenaikan tersebut dipicu oleh penjerapan elektron pada situs logam. Mekanisme migrasi elektron pada permukaan semikonduktor yang termodifikasi logam melalui tahap eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi dan setelah mengalami eksitasi, elektron bermigrasi menuju logam dan terperangkap dalam logam, sehingga rekombinasi *electron-hole* dapat ditekan. Dengan demikian *hole* akan leluasa berdifusi ke permukaan semikonduktor dimana terjadi oksidasi senyawa-senyawa yang didegradasi, seperti ditunjukkan Gambar 3.

Degradasi fotoelektrokatalisis *Remazol Yellow FG* dengan sumber sinar matahari merupakan aplikasi praktis dan murah. Setting alat untuk fotoelektrodegradasi menggunakan sinar matahari sama dengan setting alat fotoelektrodegradasi menggunakan lampu UV. Hanya saja lampu UV diganti dengan sinar matahari dan permukaan semikonduktor yang luas menghadap ke atas agar terkena sinar matahari secara langsung. Data penurunan absorbansi dan interpolasinya ke konsentrasi ditunjukkan pada Lampiran 13. Grafik fotoelektrodegradasi menggunakan sinar matahari dapat dilihat pada Gambar 26.



Gambar 26. Grafik fotoelektrodegradasi *Remazol Yellow FG* dengan sinar matahari

Cuaca dan kondisi lingkungan mempengaruhi intensitas yang dipancarkan. Pada penelitian ini intensitas sinar matahari pada musim panas tak berawan ditunjukkan pada Tabel 3. Data pengukuran intensitas sinar matahari ditunjukkan oleh Lampiran 15.

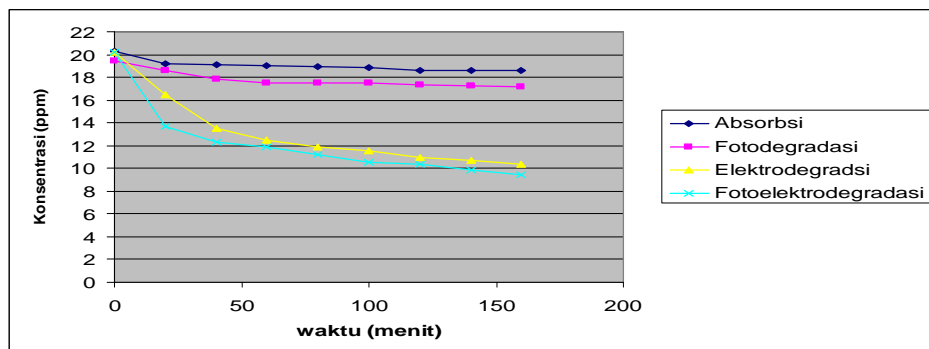
Tabel 3. Pengukuran intensitas sinar matahari

Waktu pengukuran	9.30 WIB	11.00 WIB	14.00 WIB
Intensitas (Lux)	57.340 ± 898	73.200 ± 751	63.900 ± 173

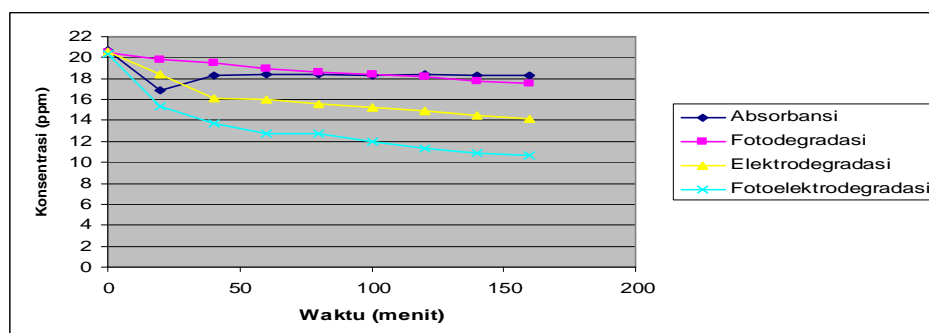
Keterangan : Standar Deviasi dianggap 1SD (Tingkat kepercayaan 68 %)

Pada Tabel 3 terlihat bahwa intensitas sinar matahari paling banyak diperoleh pada saat pertengahan waktu degradasi yaitu pukul 11.00 WIB.

Pada Gambar 25 dan 26 terlihat bahwa penurunan terbanyak konsentrasi *Remazol Yellow FG* menggunakan material semikonduktor grafit/TiO₂/Cu dan material semikonduktor grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu. Pada 160 menit pertama degradasi, karakteristik degradasi kedua material semikonduktor terlihat pada Gambar 27 dan Gambar 28.



Gambar 27. Karakteristik degradasi material semikonduktor grafit/TiO₂/Cu

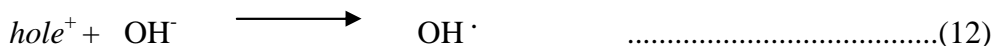
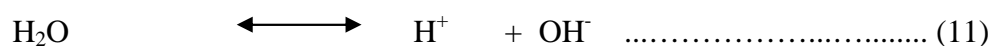
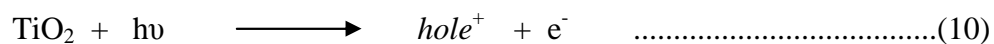


Gambar 28. Karakteristik degradasi material semikonduktor grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu

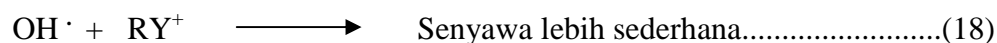
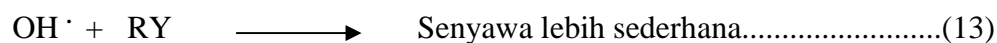
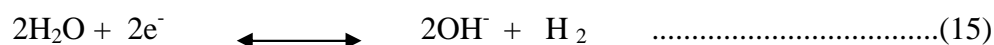
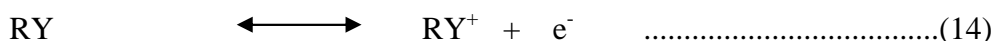
Pada Gambar 27 dan 28 terlihat bahwa penurunan konsentrasi zat warna *Remazol Yellow FG* terbesar menggunakan metode fotoelektrodegradasi. Metode Fotoelektrodegradasi sinar UV menggunakan semikonduktor grafit/TiO₂/Cu pada 60 menit pertama degradasi memiliki $\eta_{60} = 77,47\%$ lebih tinggi dibandingkan menggunakan metode fotodegradasi dan 11,52 % lebih tinggi dibandingkan metode elektrodegradasi (perhitungan pada Lampiran 16). Pada semikonduktor grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu dengan metode Fotoelektrodegradasi sinar UV memiliki persentase penurunan konsentrasi zat warna *Remazol Yellow FG* 67,05 % lebih tinggi dibandingkan menggunakan metode fotodegradasi dan 15,98 %

lebih tinggi dibandingkan metode elektrodegradasi (perhitungan pada Lampiran 16). Sehingga metode fotoelektrodegradasi dinilai paling efektif.

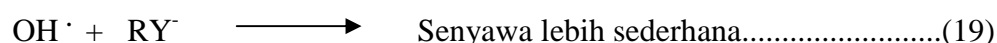
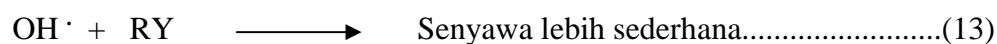
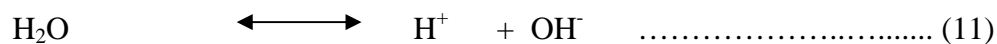
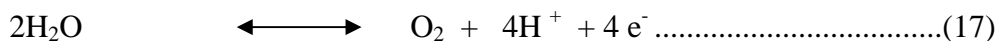
Kemungkinan reaksi yang terjadi pada fotoelektrodegradasi sebagai berikut :



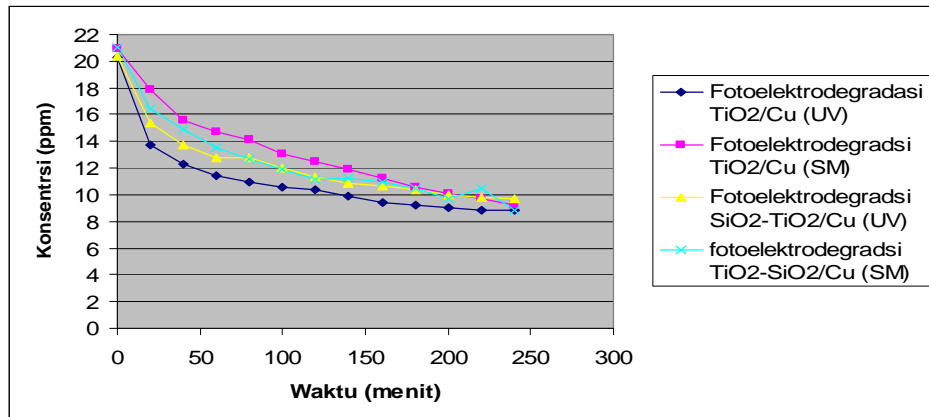
Jika *Remazol Yellow FG* mengalami oksidasi maka reaksi yang terjadi :



Jika *Remazol Yellow FG* mengalami reduksi maka reaksi yang terjadi :



Grafik fotoelektrodegradasi zat warna *Remazol Yellow FG* menggunakan material semikonduktor grafit/TiO₂/Cu dan material semikonduktor grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu menggunakan sumber sinar lampu UV dan sinar matahari ditunjukkan oleh Gambar 29.

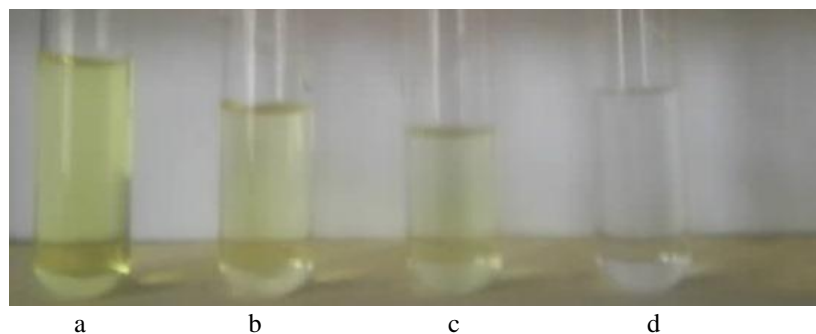


Gambar 29. Perbandingan fotelektrodegradasi dengan material semikonduktor grafit/TiO₂/Cu dan grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu yang memakai sumber sinar lampu UV dan sinar matahari

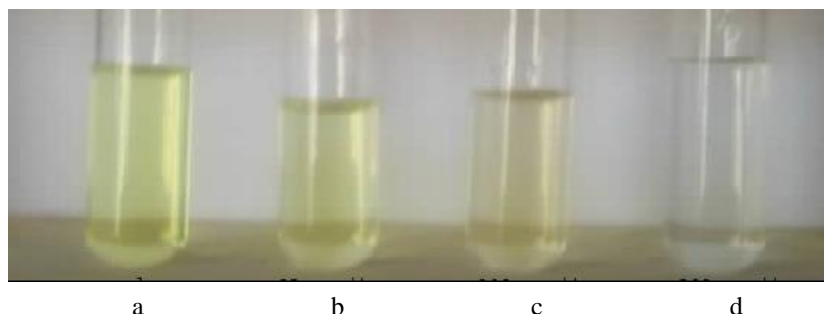
Pada Gambar 29 terlihat bahwa penurunan konsentrasi *Remazol Yellow FG* dengan metode fotelektrodegradasi dengan sinar UV lebih banyak dibandingkan dengan fotelektrodegradasi dengan sinar matahari. Efisiensi relatif pada 60 menit pertama degradasi (η_{60}) dengan fotelektrodegradasi sinar UV menggunakan material semikonduktor grafit/TiO₂/Cu 13,91 % lebih tinggi daripada menggunakan semikonduktor grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu (perhitungan pada Lampiran 16). Dengan demikian material semikonduktor yang digunakan untuk mendegradasi limbah zat warna *Remazol Yellow FG* adalah grafit/TiO₂/Cu. Meskipun berdasarkan Wibowo (2006) material komposit TiO₂-SiO₂ terdapat banyak fase seperti fase TiO₂-SiO₂, TiO₂ anatase, TiO₂ rutil, dan SiO₂ akan memberikan pengaruh terhadap jalannya eksitasi elektron serta arah aliran elektron. Fase – fase tersebut memiliki energi gap yang berbeda - beda sehingga akan mempengaruhi efek fotokatalitik. Setelah terbentuk komposit TiO₂-SiO₂ maka aliran elektron dari TiO₂ ke SiO₂ teraktifkan dan akan mengurangi rekombinasi h^+ . Ketika elektron berada pada SiO₂ elektron akan berada jauh dari hole sehingga rekombinasi akan sulit terjadi (Gambar 7), apalagi setelah penempelan logam Cu sebagai penjebak elektron dimana seharusnya rekombinasi semakin kecil dibandingkan material semikonduktor grafit/TiO₂/Cu. Hal ini ditunjukkan dengan efisiensi konversi foton ke arus listrik (% IPCE) yang

menunjukkan efektivitas sifat fotokatalitik semikonduktor. Persen IPCE material lapis tipis semikonduktor grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{Cu}$ ($45,5 \cdot 10^{-2} \%$) lebih besar daripada material semikonduktor grafit/ TiO_2/Cu ($14,208 \cdot 10^{-2} \%$). Hal itu mungkin dikarenakan penempelan lapis tipis komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ pada substrat grafit kurang kuat, meskipun uji anova pada 60 menit pertama degradasi dengan level signifikansi 0,05 ternyata tidak menunjukkan beda nyata (Lampiran 17).

Warna larutan zat warna *Remazol Yellow FG* hasil fotoelektrodegradasi yang diperkirakan telah terdegradasi sempurna oleh material semikonduktor grafit/ TiO_2/Cu dengan lampu UV ditunjukkan oleh Gambar 30. Sedangkan Gambar 31 menunjukkan hasil fotoelektrodegradasi yang diperkirakan telah terdegradasi sempurna oleh material semikonduktor grafit/ TiO_2/Cu dengan sinar matahari.



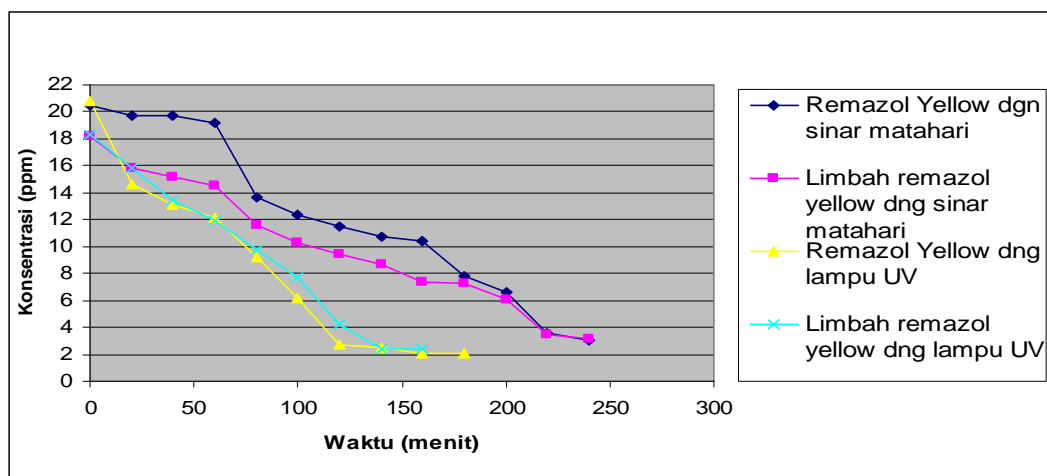
Gambar 30. Foto larutan degradasi zat warna *Remazol Yellow FG* dengan lampu UV. (a) Larutan awal, (b) setelah terdegradasi 60 menit, (c) setelah terdegradasi 120 menit, dan (d) hasil akhir degradasi 160 menit



Gambar 31. Foto larutan degradasi zat warna *Remazol Yellow FG* menggunakan sinar matahari. (a) Larutan awal, (b) setelah terdegradasi 60 menit, (c) setelah terdegradasi 140 menit, dan (d) hasil akhir degradasi 240 menit

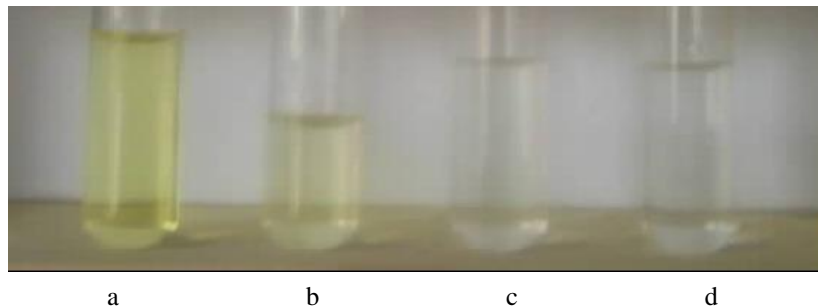
C. Degradasi Fotoelektrokatalisis Limbah Zat Warna *Remazol Yellow FG*

Material yang dipilih untuk mendegradasi limbah *Remazol Yellow FG* adalah Grafit/TiO₂/Cu. Berdasarkan pengukuran degradasi fotoelektrokatalisis *Remazol Yellow FG* menggunakan lampu UV, grafit/TiO₂/Cu mempunyai efektivitas degradasi *Remazol Yellow FG* yang paling tinggi. Aplikasi fotoelektrodegradasi limbah zat warna *Remazol Yellow FG* menggunakan 3 keping material semikonduktor untuk melihat pengaruhnya terhadap penurunan konsentrasi *Remazol Yellow FG*. Grafik fotoelektrodegradasi limbah zat warna *Remazol Yellow FG* menggunakan lampu UV maupun sinar matahari terlihat pada Gambar 32.

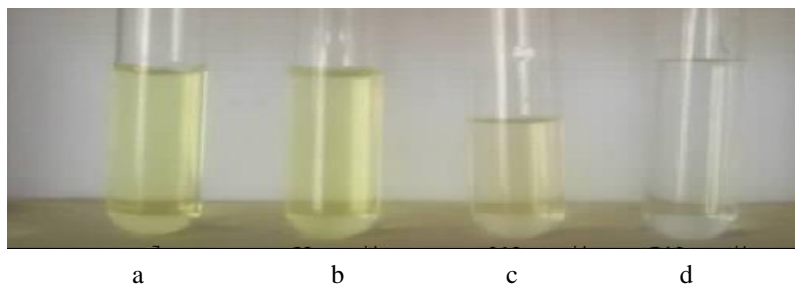


Gambar 32. Fotoelektrodegradasi Limbah dan zat warna *Remazol Yellow FG* menggunakan semikonduktor grafit/TiO₂/Cu dengan sumber sinar UV dan matahari.

Pada Gambar 32 terlihat bahwa penurunan konsentrasi limbah zat warna *Remazol Yellow FG* menggunakan lampu UV lebih cepat dibandingkan menggunakan sinar matahari. Warna larutan limbah zat warna *Remazol Yellow FG* hasil degradasi fotoelektrokatalisis yang diperkirakan telah terdegradasi sempurna menggunakan material semikonduktor grafit/TiO₂/Cu ditunjukkan oleh Gambar 33 dan Gambar 34.



Gambar 33. Foto larutan degradasi limbah zat warna *Remazol Yellow FG* dengan lampu UV. (a) Larutan awal, (b) setelah terdegradasi 60 menit, (c) setelah terdegradasi 120 menit, dan (d) hasil akhir degradasi 160 menit

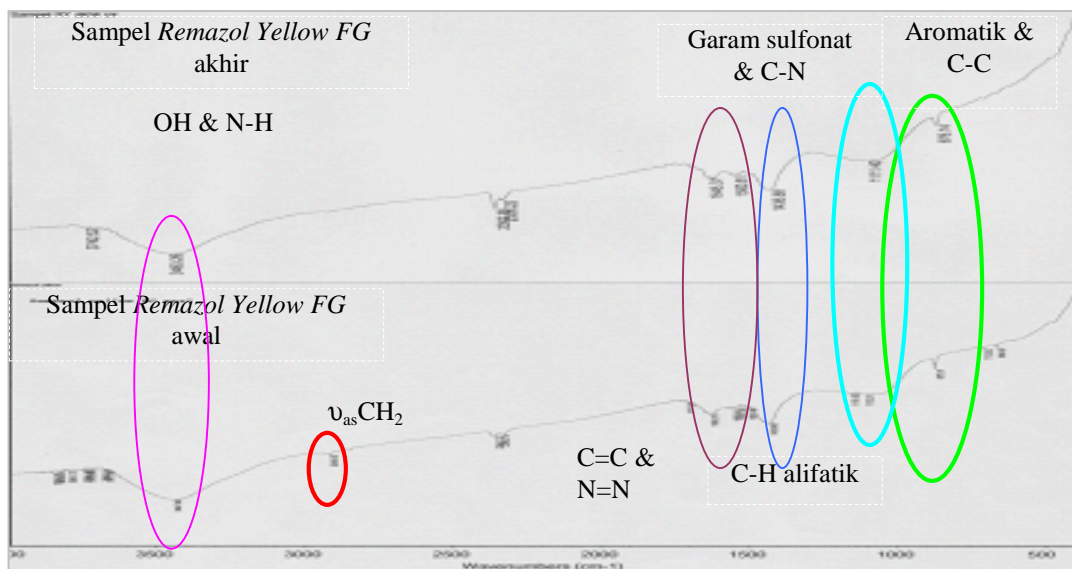


Gambar 34. Foto larutan degradasi limbah zat warna *Remazol Yellow FG* menggunakan sinar matahari. (a) Larutan awal, (b) setelah terdegradasi 60 menit, (c) setelah terdegradasi 140 menit, dan (d) hasil akhir degradasi 240 menit

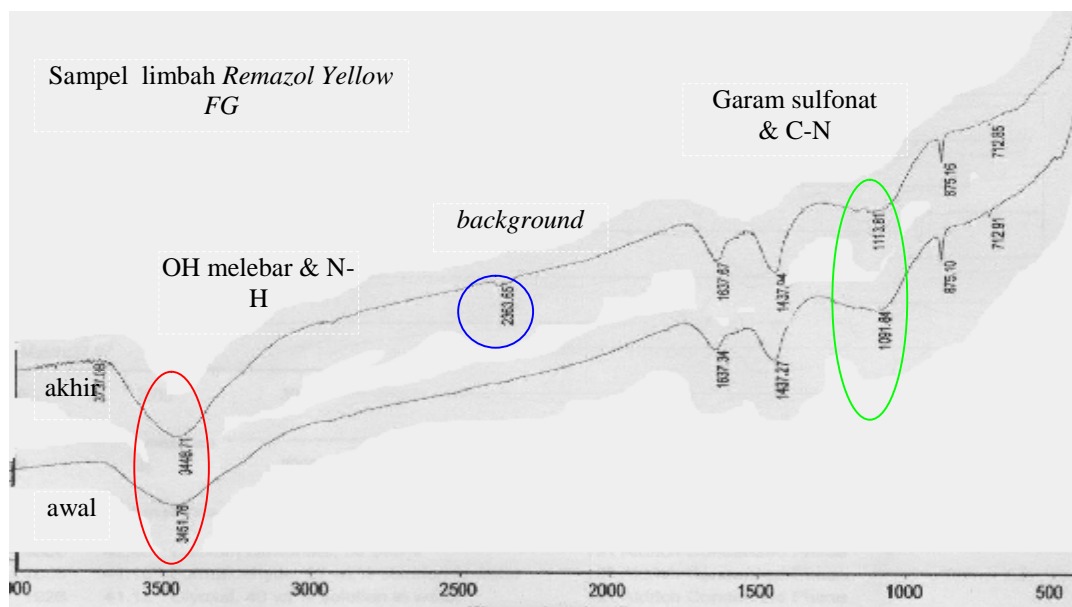
D. Penentuan Gugus – Gugus Fungsi Zat Warna *Remazol Yellow FG* dengan FT-IR

Penentuan gugus – gugus fungsi zat warna *Remazol Yellow FG* dilakukan pada zat warna sebelum dan setelah terdegradasi. Sampel zat warna *Remazol Yellow FG* yang dianalisis adalah yang diperkirakan telah terdegradasi sempurna (absorbansi mendekati nol).

Hasil analisis gugus – gugus fungsi zat warna dan limbah *Remazol Yellow FG* menggunakan FT – IR sebelum dan sesudah terdegradasi terlihat pada Gambar 35 dan Gambar 36. Spektra FT – IR *Remazol Yellow FG* lengkap ditunjukkan oleh Lampiran 18.



Gambar 35. Spektra FT – IR sampel zat warna *Remazol Yellow FG*



Gambar 36. Spektra FT – IR sampel limbah zat warna *Remazol Yellow FG*

Pada Gambar 35 dan Gambar 36 terlihat adanya perubahan gugus-gugus fungsi sebelum dan sesudah terdegradasi. Perbandingan puncak-puncak spektra IR sebelum dan sesudah degradasi ditunjukkan oleh Tabel 4.

Tabel 4. Puncak – puncak spektra IR sebelum dan sesudah terdegradasi

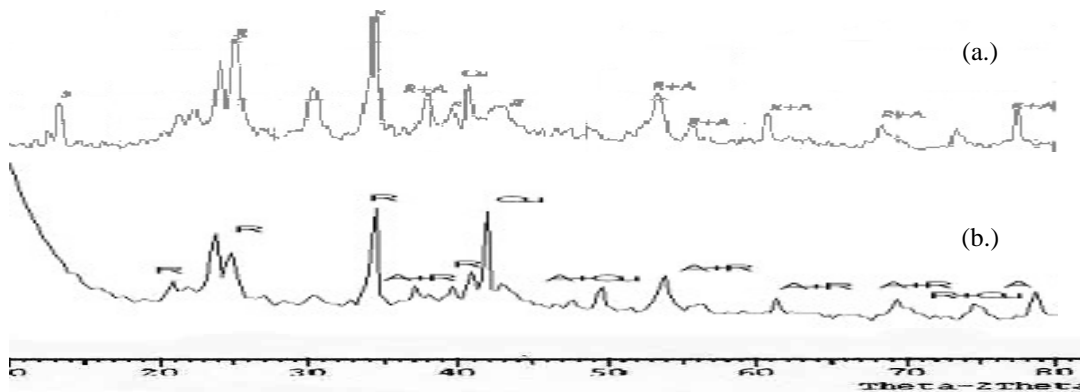
Puncak yang muncul	<i>Remazol Yellow FG</i> (cm ⁻¹)		Limbah <i>Remazol Yellow FG</i> (cm ⁻¹)	
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
Tekukan C—H aromatik sidik jari	875	876	875	875
Uluran N=N	1559	hilang	-	-
Uluran SO ₃ ⁻ garam sulfonat dan C-N	1113	1161	1091	1113
Uluran C=C aromatik	1636	1645	1637	1637
$\nu_{as}CH_2$	2919	hilang	-	-
Uluran OH melebar & N-H	3447	3463	3451	3448

Pada Tabel 4 terlihat bahwa perubahan gugus fungsi pada zat warna *Remazol Yellow FG* sebelum terdegradasi dan setelah terdegradasi yaitu penghilangan $\nu_{as}CH_2$ dan uluran N=N, kemudian pergeseran puncak uluran garam sulfonat, puncak uluran aromatik C=C, uluran OH melebar dan uluran N-H. Sedangkan Perubahan gugus fungsi pada limbah zat warna *Remazol Yellow FG* sebelum dan setelah degradasi yaitu pergeseran uluran puncak garam sulfonat, uluran OH melebar. Gugus fungsi zat warna dan limbah zat warna *Remazol Yellow FG* setelah terdegradasi kebanyakan masih nampak, hal ini karena zat warna *Remazol Yellow FG* masih tersisa pada larutan hasil akhir degradasi (Gambar 32), meskipun warna larutan telah jernih.

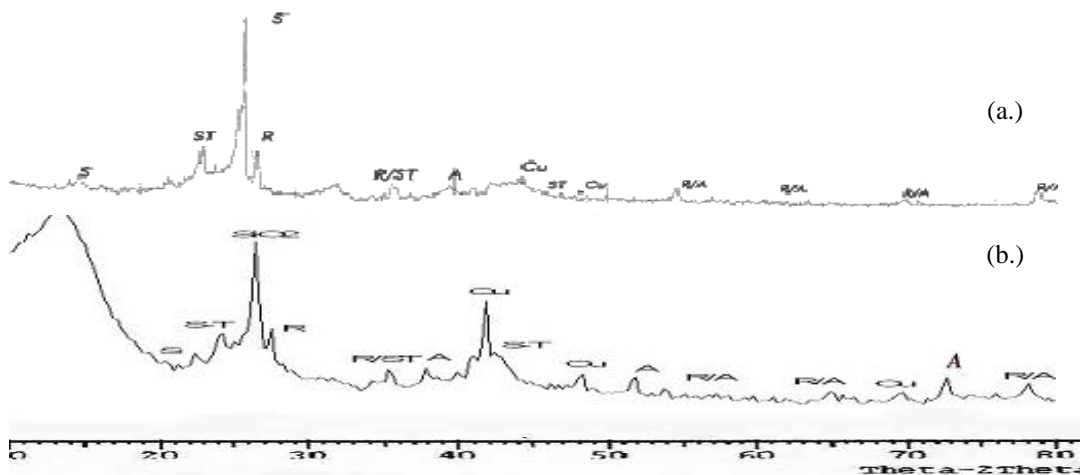
E. Pola Difraksi Hasil *Recycle* Grafit/TiO₂/Cu, dan Grafit/Komposit TiO₂-SiO₂/Cu

Pola difraksi XRD material semikonduktor grafit/TiO₂/Cu maupun grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu yang telah digunakan untuk mendegradasi zat warna maupun limbah zat warna *Remazol Yellow FG* dapat digunakan untuk menduga kemungkinan material semikonduktor tersebut masih bisa digunakan lagi. Pola difraksi dari material semikonduktor grafit/TiO₂/Cu dan

grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{Cu}$ yang telah *direcycle* dengan cara direndam dalam akuades selama 10 menit terlihat pada Gambar 37 dan Gambar 38. Pola difraksi grafit/ TiO_2/Cu *recycle* dan grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{Cu}$ *recycle* secara lengkap ditunjukkan oleh Lampiran 19 dan Lampiran 20.



Gambar 37. Pola difraksi material semikonduktor grafit/ TiO_2/Cu (a) hasil *recycle* (b) hasil sintesis



Gambar 38. Pola difraksi material semikonduktor grafit/ $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{Cu}$ (a) hasil *recycle* (b) hasil sintesis

Pada Gambar 37 dan 38 terlihat bahwa secara umum puncak-puncak yang muncul pada hasil sintesis juga muncul pada hasil *recycle*, hanya saja bentuknya lebih amorf yang ditunjukkan oleh beberapa puncak melebar terutama puncak Cu pada $2\theta = 43$. Hal ini menunjukkan material semikonduktor tersebut mempunyai kemungkinan untuk dapat digunakan kembali, tetapi perlu studi lebih lanjut tentang proses *recycle* yang lebih baik.

BAB V

KESIMPULAN DAN PENUTUP

A. Kesimpulan

1. Metode fotoelektrodegradasi dengan sinar UV pada semikonduktor grafit/TiO₂/Cu memiliki efisiensi relatif pada 60 menit pertama degradasi (η_{60}) 77,47 % lebih tinggi dibandingkan dengan metode fotodegradasi dan 11,52 % lebih tinggi dibandingkan dengan metode elektrodegradasi. Sehingga metode fotoelektrodegradasi dengan sinar UV yang digunakan untuk mendegradasi limbah zat warna *Remazol Yellow FG*.
2. Efisiensi relatif pada 60 menit pertama degradasi (η_{60}) menggunakan semikonduktor grafit/TiO₂/Cu dengan fotoelektrodegradasi sinar UV 72,57 % lebih tinggi dibandingkan grafit/TiO₂. Sedangkan menggunakan semikonduktor grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu dengan fotoelektrodegradasi sinar UV 33,25 % lebih tinggi dibandingkan dengan grafit/komposit TiO₂-SiO₂.
3. Semikonduktor lapis tipis grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu memiliki efisiensi relatif pada 60 menit pertama degradasi (η_{60}) dengan fotoelektrodegradasi sinar UV 13,91 % lebih rendah dibandingkan dengan semikonduktor grafit/ TiO₂/Cu, meskipun dengan uji anova tidak menunjukkan adanya beda nyata. Hal itu kemungkinan karena penempelan lapisan komposit TiO₂-SiO₂ kurang kuat pada permukaan grafit. Sehingga semikonduktor grafit/TiO₂/Cu yang digunakan untuk mendegradasi limbah zat warna *Remazol Yellow FG*.
4. Perubahan gugus fungsi zat warna *Remazol Yellow FG* terjadi pada penghilangan ν_{as} CH₂ dan uluran N=N, kemudian pergeseran puncak uluran garam sulfonat, puncak uluran aromatik C=C, uluran OH melebar dan uluran N-H. Sedangkan pada limbah zat warna *Remazol Yellow FG* hanya terjadi pergeseran puncak uluran garam sulfonat, uluran OH melebar. Perubahan gugus – gugus fungsi tersebut belum cukup signifikan untuk menunjukkan perubahan struktur kimia zat warna *Remazol Yellow*

FG. Hal itu karena zat warna *Remazol Yellow FG* masih tersisa yang pada larutan hasil akhir degradasi, meskipun warna larutan telah jernih.

B. SARAN

1. Perlu dilakukan studi lebih lanjut tentang metode pelapisan semikonduktor lapis tipis grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ yang lebih baik.
2. Perlu dilakukan studi lebih lanjut tentang mekanisme degradasi zat warna *Remazol Yellow FG* sehingga dapat dijadikan acuan untuk penyempurnaan metode degradasi zat warna *Remazol Yellow FG* menggunakan semikonduktor grafit/ TiO_2 , grafit/ TiO_2/Cu , grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$, dan grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{Cu}$ yang lebih efektif dan efisien.
3. Perlu studi lebih lanjut tentang proses *recycle* yang lebih baik.
4. Perlu dilakukan penggunaan jumlah adsorben yang sebanding antara zat warna sebelum dan setelah degradasi untuk perlakuan awal sebelum analisis FT – IR.
5. Perlu dilakukan analisis spektra elektronik pada 200 – 600 nm dari larutan hasil degradasi untuk mengetahui kemungkinan terjadi perubahan spektra baik pergeseran λ_{maks} zat warna maupun munculnya puncak baru.

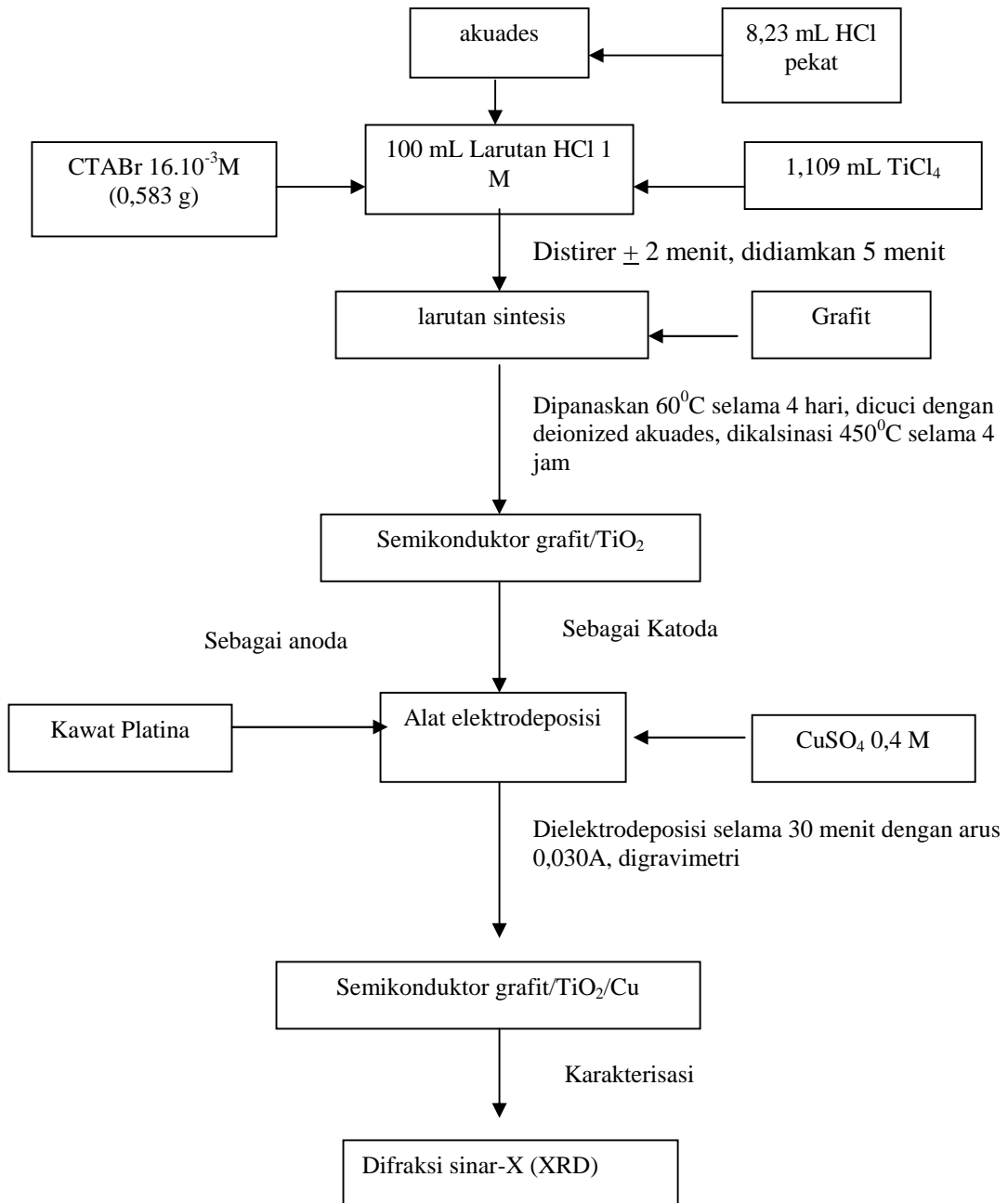
DAFTAR PUSTAKA

- Ao, C.H., S.C. Lee, J.Z. Yu, J.H. Xu. 2004, **Photodegradation of formaldehyde by Photocatalyst TiO_2 : effect on Presences of NO , SO_2 , VOCS**, *Applied Catalyst B Environmetal*, Vol 51, Hal 41-50.
- Amemiya, S. 2004, **Titanium-Oxide Photocatalyst**, *Three Bond Technical News*, Vol. 62, Three Bond Company Ltd., Tokyo.
- Atmaji,P., P. Wahyu, P. P. Edi. 1999, **Daur Ulang Limbah Hasil Pewarnaan Industri Tekstil**, *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia*, Vol.1, No.4.
- Ewing, G. W. 1960. *Instrumental Methods of Chemical Analysis*. 3rd Edition. Mc Graw Hill Book Company Inc. Kogakusha Company LTD., Tokyo.
- Fujishima, A., and T. N. Rao. 1998, **Interfacial Photochemistry : Fundamental and Applications**, *Pure & Appl.Chem.*, Vol 70, No 11, Hal 2177-2187.
- Gardiana, M. D. 2004. *Studi Penggunaan Katalis Semikonduktor ZnO dengan Penambahan Ion Logam Hg^+ dan Ion OH untuk Fotodegradasi Zat Warna Remazol Yellow*. Skripsi. Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Gunlazuardi, J. 2001, **Fotokatalisis pada Permukaan TiO_2 : Aspek Fundamental dan Aplikasinya**, *Seminar Nasional Kimia Fisika II*, Universitas Indonesia, Jakarta.
- Handayani, N. 2006. *Modifikasi Permukaan Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/ TiO_2 secara Surface Metal Modification dengan Logam Tembaga (Cu)*. Skripsi. Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Hasim, F. I. 2006. *Modifikasi Permukaan Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/ TiO_2 dengan Penempelan Logam Perak (Ag) secara Elektrodeposisi*. Skripsi. Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- He, C., Y. Xiong., C. Zha., X. Wang, X. Zhu. 2003, **Approach To Pulse Photoelectrocatalytic Process for the Degradation of Organic Pollutants**, *J.Chem. Technol Biotechnol.*, 78 : 717-723.
- Hendayana, S., 1994. Kimia Analitik Instrumen. Edisi 1. IKIP Semarang, Semarang. Hal 157-160.
- Hoffman, M.R., S.T. Martin, W.J. Choi, D.W. Bahnemann. 1995, **Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis**, *Chem.Rev.*, 95, Hal 69-96.

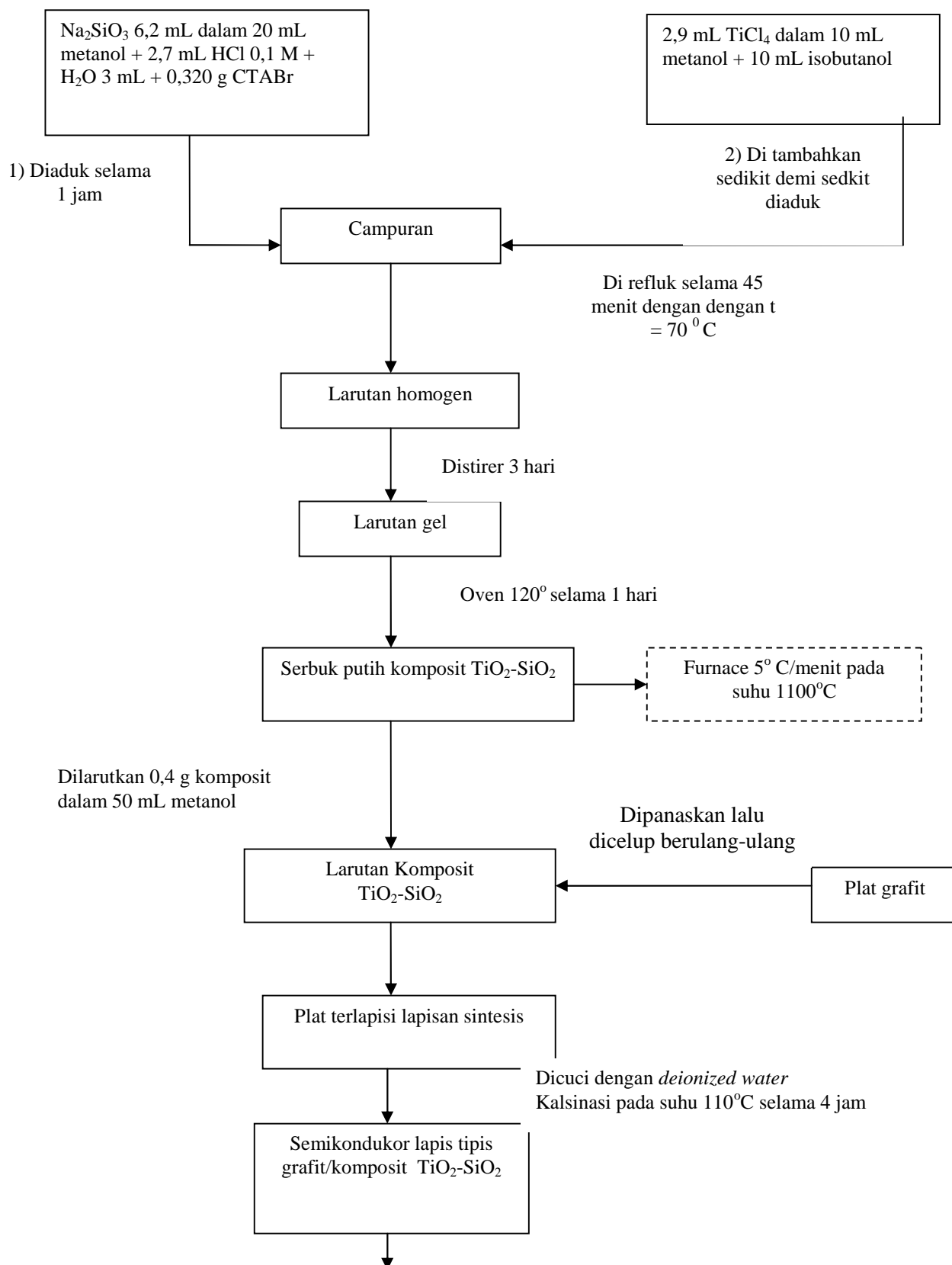
- Ichikawa, S., and R. Doi. 1996, **Hydrogen Production from Water and Conversion of Carbon Dioxide to Useful Chemicals by Room Temperature Photoelectrocatalysis**, *Catalysis Today*, 27, Hal 271-277.
- Isminingsih, L. Djufri, Rasjid. 1982. *Pengantar Kimia Zat Warna*. Institut Teknologi Tekstil, Bandung.
- Irianti, D. 2006. *Modifikasi Permukaan Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/Komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ dengan Penempelan Logam Perak (Ag) Secara Elektrodeposisi*. Skripsi. Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Jenkins, F. A, and H. E. White. 1988. *Fundamental of Optics*. 4th Edition. Mc Graw-Hill International Edition, New York. Hal 34-38.
- Linsebigler, A.L., G. Lu, J.T. Yates. 1995, **Photocatalysis on TiO_2 Surfaces: Principles, Mechanism, and Selected Result**, *Chem. Rev.*, 95, Hal 735-758.
- Mudjijono. 1998, **Fotodegradasi beberapa Zat Warna Menggunakan TiO_2** , *Prosiding Seminar Nasional II Jaringan Kerjasama Kimia Indonesia*, Yogyakarta.
- Nugraheni, L. R. 2006. *Sintesis Semikonduktor Komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ Menggunakan Pelarut Metanol-Isobutanol dan Sensitisasi Komposit dengan Kompleks $\text{Mn}(\text{bpy-pts})_2\text{Cl}_2$* . Skripsi. Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Park, N.G., G. Schlichthorl, J. Van de Lagemaat, H.M. Cheong, A. Mascarenhas, A.J. Frank. 2004, **Morphological and Photoelectrochemical Characterization of Core-Shell Nanoparticle Film for Dye-Sensitized Solar Cells: Zn-O Type Shell on SnO_2 and TiO_2 Cores**, *Langmuir*., 20, Hal 4246-4253.
- Rahmawati, F., S. Wahyuningsih, P. A.Windu. 2006, **Sintesis Lapis Tipis TiO_2 pada Substrat Grafit Secara Chemical Bath Deposition**, *Indo.J.Chem.*, 6(2), Hal 121 – 126.
- Rahmawati, F. dan A. Masykur. 2003. *Modifikasi Semikonduktor TiO_2 dengan Penempelan Cu secara Elektrodeposisi untuk Meningkatkan Efektivitas Fotokatalitik TiO_2* . laporan penelitian dasar. Dirjen Dikti, Depdiknas.

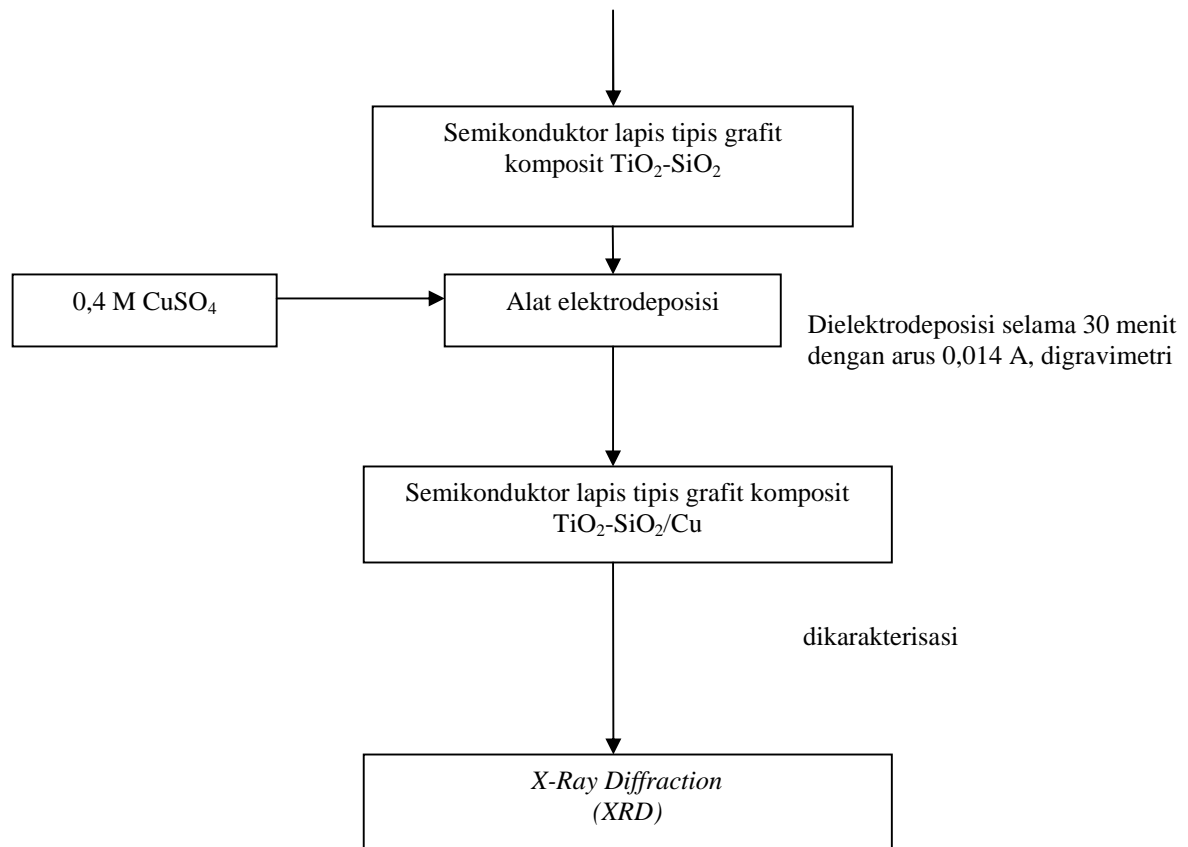
- Rainho, J.P., J. Rocha, L.D. Carlos, R.M. Almeida. 2001, **²⁹Si Nuclear-Magnetic-Resonance and Vibrational Spectroscopy Studies Of SiO₂-TiO₂ Powders Prepared by The Sol-Gel Process**, *J. Mater. Res.*, Vol. 16, No. 8.
- Rasjid. 1976. *Teknologi Pengelantangan, Pencelupan dan Pencapan*. Institut Teknologi Tekstil, Bandung. Hal 133-135.
- Saraswati, T. E. 2003. *Efektifitas Zeolit-TiO₂ sebagai Fotokatalis dalam Reaksi Fotodegradasi Larutan Zat Warna Metilen Blue*. Skripsi. Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Sato, S and J. M. White. 1980. **Photodecomposition of Water Over Pt/TiO₂ Catalysts**, *Chemical Physics Letters*, Vol. 72, 83-86.
- Schmidt, H., and M. Mennig. 2003. *Wet Coating Technologies for Glass*. Institut für Neue Materialien, Germany.
- Silverstein, D.F, P.W. Atkins, T.C. Morill. 1984. *Penyelidikan Spektrometrik Senyawa Organik*. Edisi 4. Erlangga, Hal 305-311.
- Skoog, W.H. 1996. *Fundamental of Analytical Chemistry*. 7th Edition. Saunders college publishing, New York. Hal 308-311.
- Tjahjanto, R.T. dan J. Gunlazuardi. 2001, **Preparasi Lapisan Tipis sebagai Fotokatalisis : Keterkaitan antara Ketebalan dan Aktivitas Fotokatalisis**, *Makara, Jurnal Penelitian Universitas Indonesia*, Vol 5, No 2, Hal 81-91.
- Underwood, A.L., and R.A. Day. 1980. *Quantitative Analysis*. 4th Edition. Prentice-Hall.Inc. Hal 393-395.
- West, A.R.,1984. *Solid State Chemistry and Its Applications*. 1st Edition. John Wiley & sons, New York. Hal 121-123.
- Wibowo, D. 2006. *Modifikasi Permukaan Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/komposit TiO₂-SiO₂ dan modifikasinya secara Surface Metal Modification dengan Logam Tembaga (Cu)*. Skripsi. Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Xu, N., Z. Shu, Y. Fan., J. Dong, J. Shi, M. Z.C. Hu. 1999, **Effect of Particle Size Of TiO₂ on Photocatalytic Degradation of Metylene Blue in Aqueous Suspensions**, *Ing.Eng.Chem.Res*, 38, Hal 375-379.
- Yu, J.C., and L.Y.L. Chan.1998, **Photocatalytic Degradation of a Gaseous organic Pollutant**, *Journal of Chemical Education*, Vol. 75, No.6.

Lampiran 1
Bagan Prosedur Kerja
Sintesis dan Karakterisasi Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/TiO₂/Cu
(Handayani, 2006)



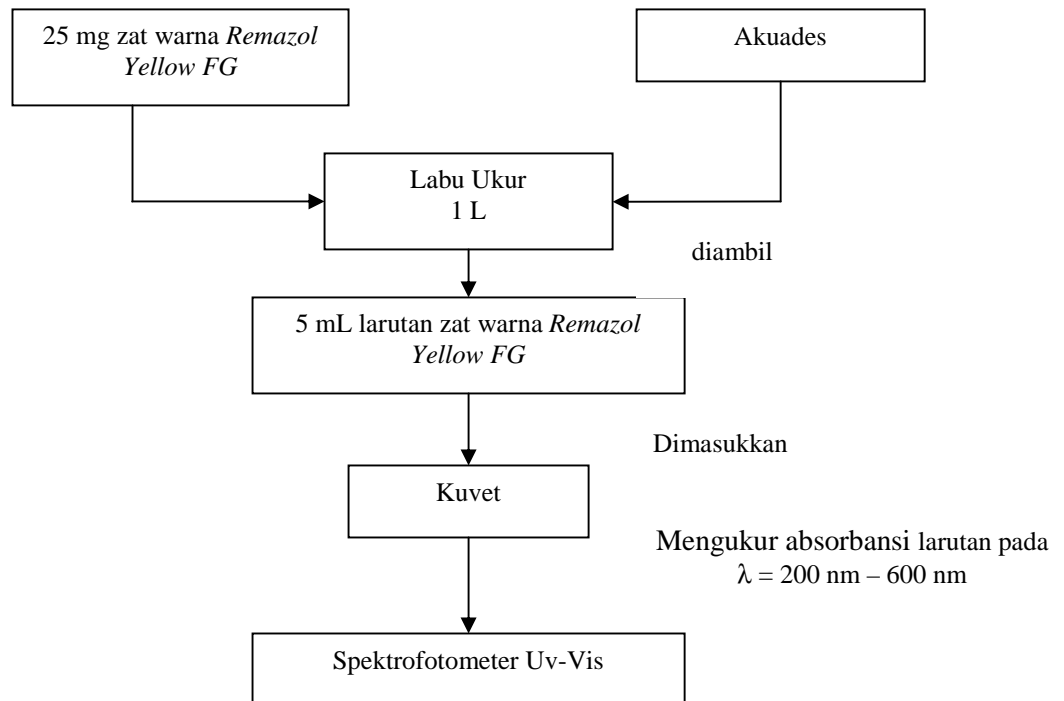
Lampiran 2
Bagan Prosedur Kerja
Sintesis Semikonduktor Lapis Tipis Grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{Cu}$
(Wibowo, 2006)



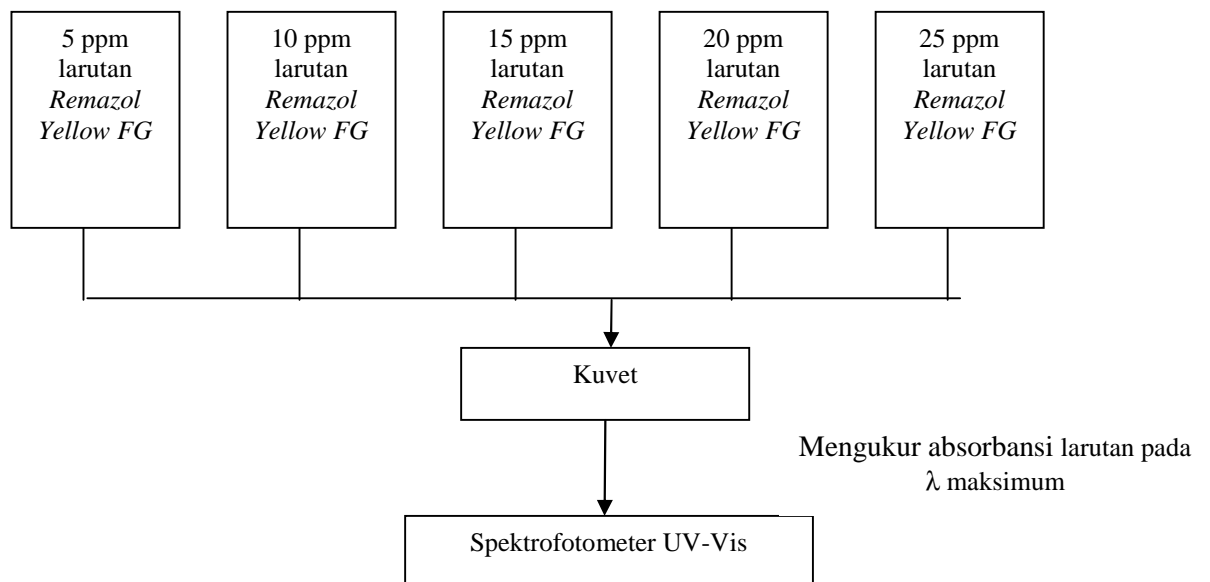


Lampiran 3
Bagan Prosedur Kerja
Aplikasi material semikonduktor grafit/TiO₂, grafit/TiO₂/Cu,
grafit/komposit TiO₂-SiO₂ dan grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu hasil sintesis
untuk degradasi zat warna *Remazol Yellow FG*

1. Penentuan Panjang Gelombang Maksimum Larutan *Remazol Yellow FG*

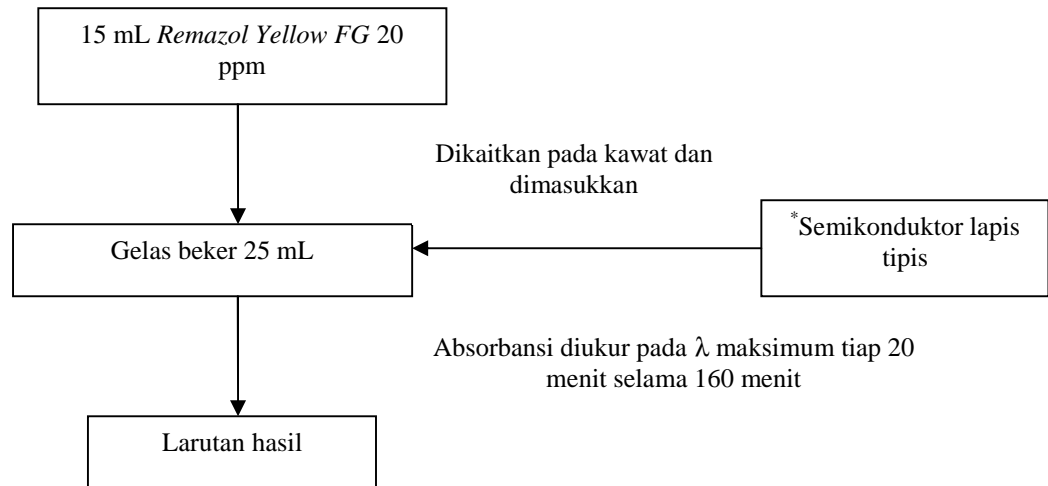


2. Pembuatan Kurva Standar *Remazol Yellow FG*



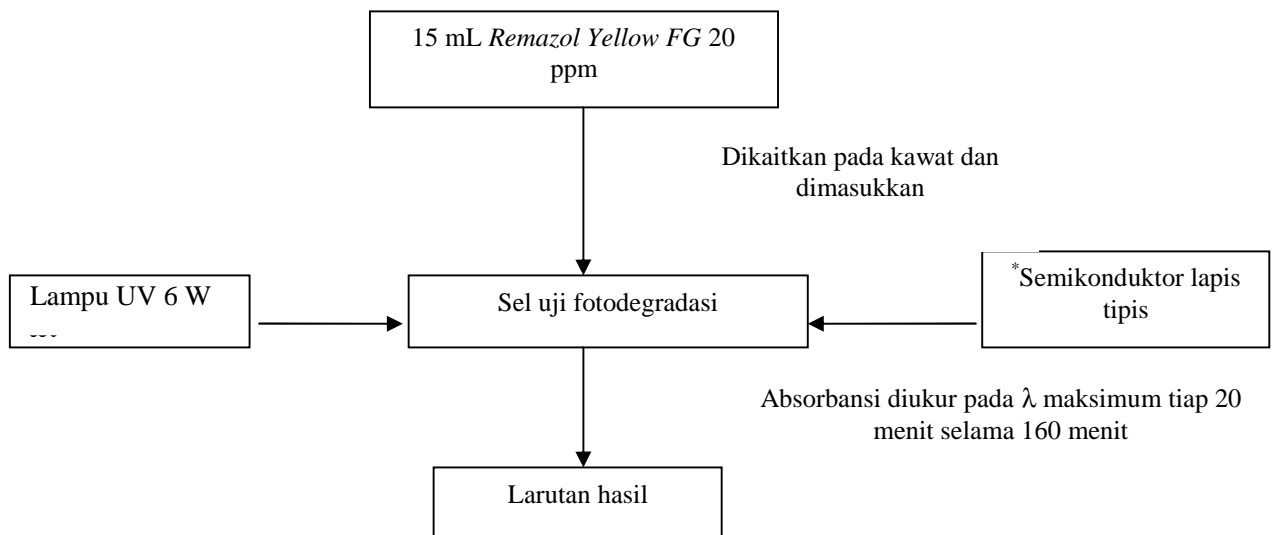
3. Pengukuran Degradasi *Remazol Yellow FG* Oleh Semikonduktor Grafit/TiO₂, Grafit/komposit TiO₂-SiO₂, Grafit/TiO₂/Cu dan Grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu

a. Absorpsi Material pada Larutan *Remazol Yellow FG*



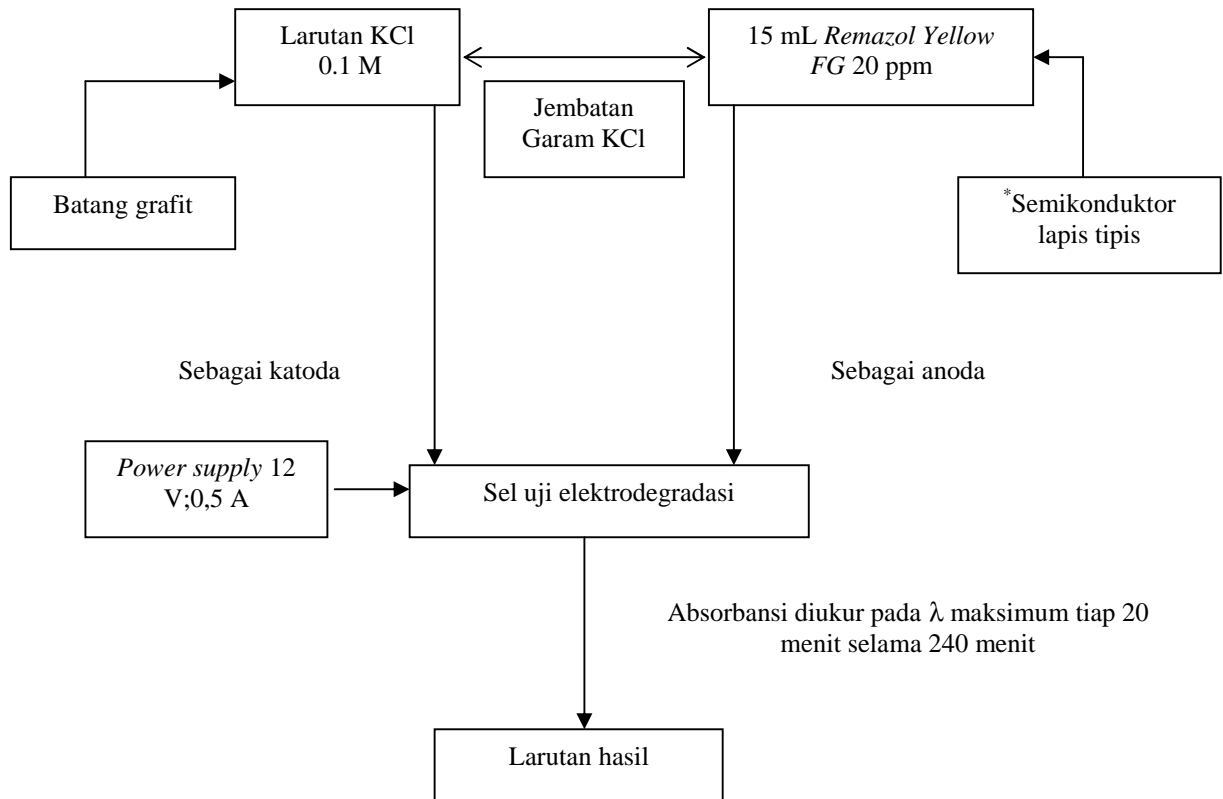
* Semikonduktor lapis tipis yang digunakan yaitu semikonduktor grafit/TiO₂, grafit/komposit TiO₂-SiO₂, grafit/TiO₂/Cu dan grafit/ komposit TiO₂-SiO₂/Cu

b. Fotodegradasi larutan zat warna *Remazol Yellow FG*



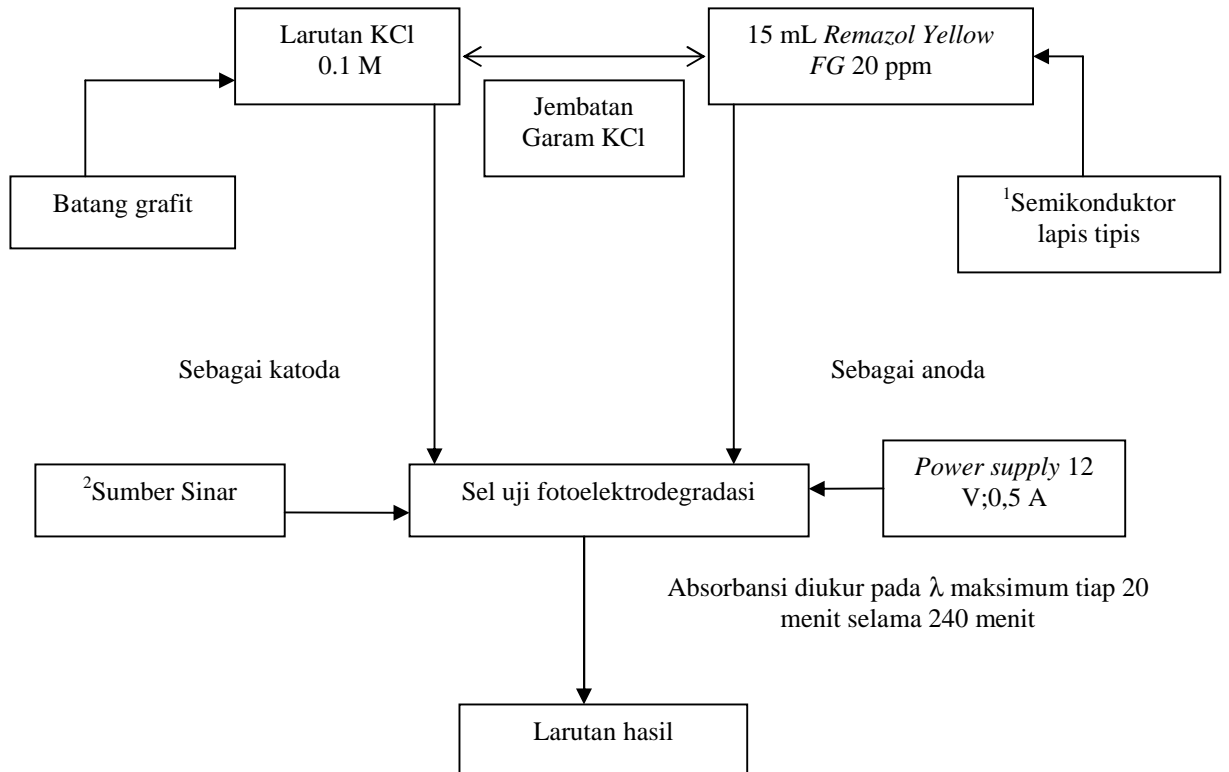
* Semikonduktor lapis tipis yang digunakan yaitu semikonduktor grafit/TiO₂, grafit/komposit TiO₂-SiO₂, grafit/TiO₂/Cu dan grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu

c. Elektrodegradasi larutan zat warna *Remazol Yellow FG*



* Semikonduktor lapis tipis yang digunakan yaitu semikonduktor grafit/TiO₂, grafit/komposit TiO₂-SiO₂, grafit/TiO₂/Cu dan grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu

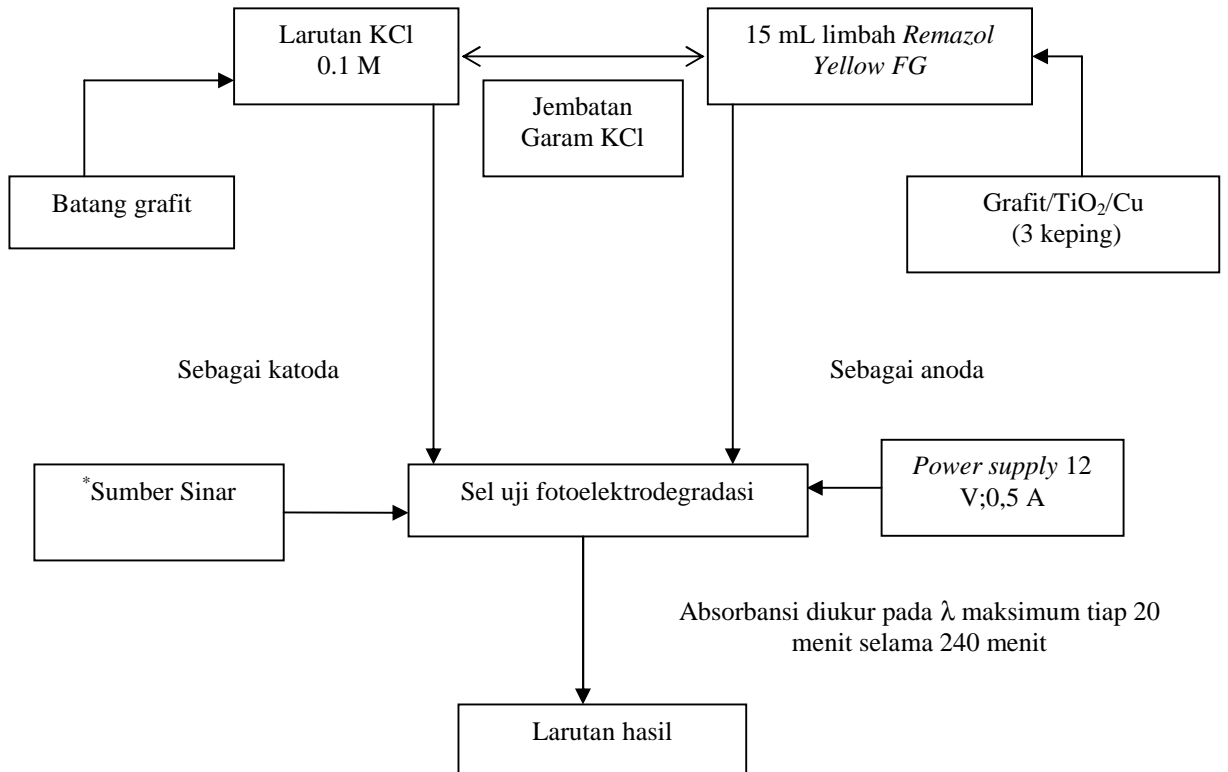
d. Fotoelektrodegradasi larutan zat warna *Remazol Yellow FG*



¹ Semikonduktor lapis tipis yang digunakan yaitu semikonduktor grafit/TiO₂, grafit/komposit TiO₂-SiO₂, grafit/TiO₂/Cu dan grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu

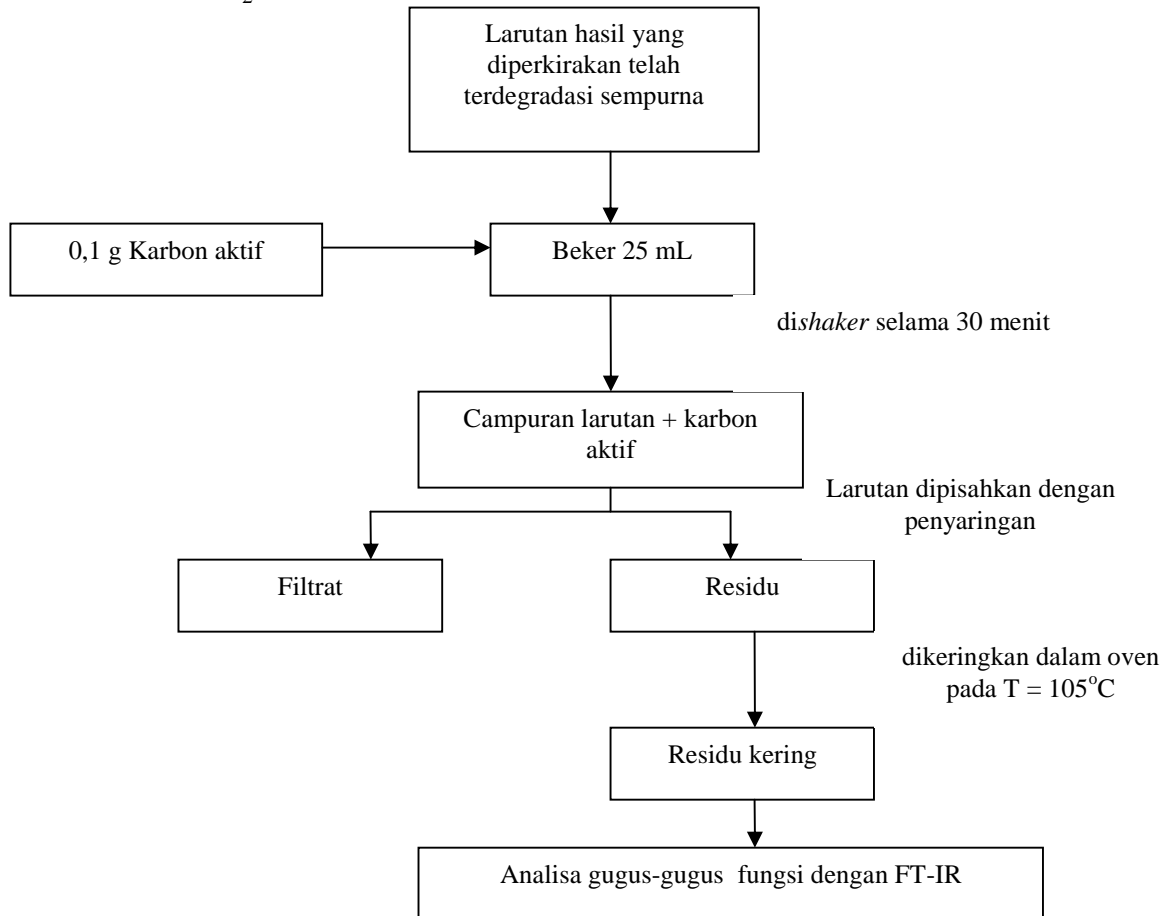
² Sumber sinar yang digunakan yaitu lampu UV dan Sinar Matahari

e. Degradasi limbah zat warna *Remazol Yellow FG* menggunakan grafit/ TiO_2 /Cu



*Sumber sinar yang digunakan yaitu lampu UV dan Sinar Matahari

4. Penentuan perubahan gugus fungsi hasil degradasi dengan semikonduktor Grafit/TiO₂/Cu



- ▼ Sebagai acuan terjadi perubahan gugus fungsi maka perlakuan serupa dilakukan pada larutan dan limbah zat warna *Remazol Yellow FG* yang belum didegradasi

Lampiran 4
Pola Difraksi Sinar X Grafit/TiO₂/Cu

*** Basic Data Process ***

Group Name : standard
Data Name : slomet lions2
File Name : slomet lions2.EKR
Sample Name : TiO₂/Cu
Comment : sampel 9

Strongest	2 peaks						
no.	peak	2Theta	d	1/I	FWHM	Intensity	Integrated Int
		(deg)	(Å)		(deg)	(Counts)	(Counts)
1	42	43.2978	2.08800	100	0.33230	1464	11645
2	34	36.3775	2.46774	90	0.41710	1322	10991
3	25	26.4424	3.36800	75	0.51380	1094	9721

# Peak	Data	List					
peak	2Theta	d	1/I	FWHM	Intensity	Integrated	Int
no.	(deg)	(Å)		(deg)	(Counts)	(Counts)	
1	5.3500	16.50504	3	0.31000	51	996	
2	5.9000	14.96761	6	0.00000	93	0	
3	6.5000	13.58727	11	0.65240	162	2773	
4	7.0000	12.61783	12	0.00000	180	0	
5	7.3500	11.69984	13	0.00000	186	0	
6	8.0500	10.97423	16	0.00000	237	0	
7	8.7500	10.09780	19	0.00000	285	0	
8	9.5000	9.30222	26	0.00000	362	0	
9	10.0000	8.83820	34	0.00000	497	0	
10	10.5000	8.41843	40	0.00000	588	0	
11	10.9500	8.07346	51	0.00000	742	0	
12	11.5000	7.68854	59	0.00000	867	0	
13	11.8500	7.46223	65	0.00000	950	0	
14	12.2000	7.24892	65	0.00000	953	0	
15	12.6000	7.01968	63	0.00000	925	0	
16	13.1500	6.72729	54	0.00000	790	0	
17	13.9500	6.34325	39	0.00000	566	0	
18	14.7000	6.02725	20	0.00000	295	0	
19	15.2500	5.80931	17	0.88580	158	3453	
20	15.9000	5.56942	4	0.45000	80	708	
21	23.8079	3.73440	17	0.52760	243	4451	
22	24.7500	3.59434	11	0.00000	167	0	
23	25.3000	3.51744	8	0.00000	124	0	
24	26.0500	3.41784	23	0.37300	343	3343	
25	26.4424	3.36800	75	0.51380	1094	9721	
26	27.4158	3.25059	44	0.80280	640	10680	
27	28.2500	3.15647	6	0.28120	82	781	
28	29.5584	3.01966	5	0.34320	79	1056	
29	32.3000	2.76934	5	0.34440	76	564	
30	32.6978	2.73655	13	0.46220	191	1564	
31	33.2757	2.69033	3	0.27360	48	305	
32	35.1273	2.55265	3	0.38810	47	500	
33	35.8000	2.50621	16	0.42000	240	3095	
34	36.3775	2.46774	90	0.41710	1322	10991	
35	37.1500	2.41818	3	0.26660	51	476	
36	38.0604	2.36240	3	0.35420	49	383	
37	38.9318	2.31151	15	0.31180	223	1381	
38	39.4228	2.28384	5	0.35060	77	583	
39	39.9212	2.25647	4	0.57750	57	568	
40	41.2299	2.18782	14	0.52290	210	2397	
41	42.3496	2.13253	40	0.38330	580	5111	
42	43.2978	2.08800	100	0.33230	1464	11645	
43	43.8500	2.06298	16	0.00000	229	0	

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	1/11	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int. (Counts)
44	44.4000	2.03889	20	1.03640	293	5177
45	45.2000	2.03445	13	0.96120	190	1842
46	45.7000	1.99367	6	0.23760	89	475
47	46.4000	1.95536	3	0.55720	45	701
48	48.6443	1.87027	9	0.63410	126	2126
49	50.0000	1.82249	5	0.16080	72	324
50	50.4278	1.80822	33	0.33700	480	3741
51	53.6500	1.70697	9	0.38880	137	1340
52	54.3702	1.68605	34	0.66860	494	7831
53	55.2000	1.66265	7	0.33580	106	1022
54	55.9000	1.64348	6	0.26080	86	467
55	56.4000	1.63009	0	0.65000	116	958
56	56.7000	1.62217	7	0.59140	107	1176
57	61.3897	1.50901	18	0.39490	262	2624
58	62.7962	1.47856	5	0.60750	67	1442
59	68.3000	1.37220	5	0.32060	72	690
60	68.8109	1.36325	16	0.38750	231	1749
61	69.2965	1.35488	8	0.38880	123	1090
62	69.7000	1.34802	6	0.00000	81	0
63	70.1000	1.34131	5	0.55000	70	1056
64	73.5500	1.28668	13	0.47000	188	1953
65	74.0758	1.27884	17	0.39670	253	2290
66	77.4621	1.21117	37	0.37020	547	4485
67	77.9000	1.22534	5	0.17280	74	538
68	79.1893	1.20859	3	0.32140	47	484
69	79.8611	1.20011	3	0.54440	45	755
70	82.4917	1.16838	5	0.35000	73	636
71	83.0000	1.16251	7	0.35220	103	752
72	83.5610	1.15612	13	0.64980	284	3157
73	84.2000	1.14897	5	0.45460	71	1144
74	86.7462	1.12167	3	0.34250	48	472
75	88.8500	1.10047	4	0.27000	54	900
76	89.2500	1.09657	6	0.00000	82	0
77	89.9500	1.08954	12	0.47940	173	1863

Differential profile: 1

FWHM threshold: 0.050 (deg)

Intensity threshold: 10 (per cell)

FWHM ratio: (w-1)/w: 3

System error correction: 1 (No)

Intensity peak correction: 1 (No)

*** Basic Data Process ***

Data Information

Group Name : standard
Data Name : siamet triums?
File Name : siamet triums2.BAW
Sample Name : TiO2/Cu
Comment : sampel 9
Date & Time : 12-01 06 08:22:35

Measurement Condition

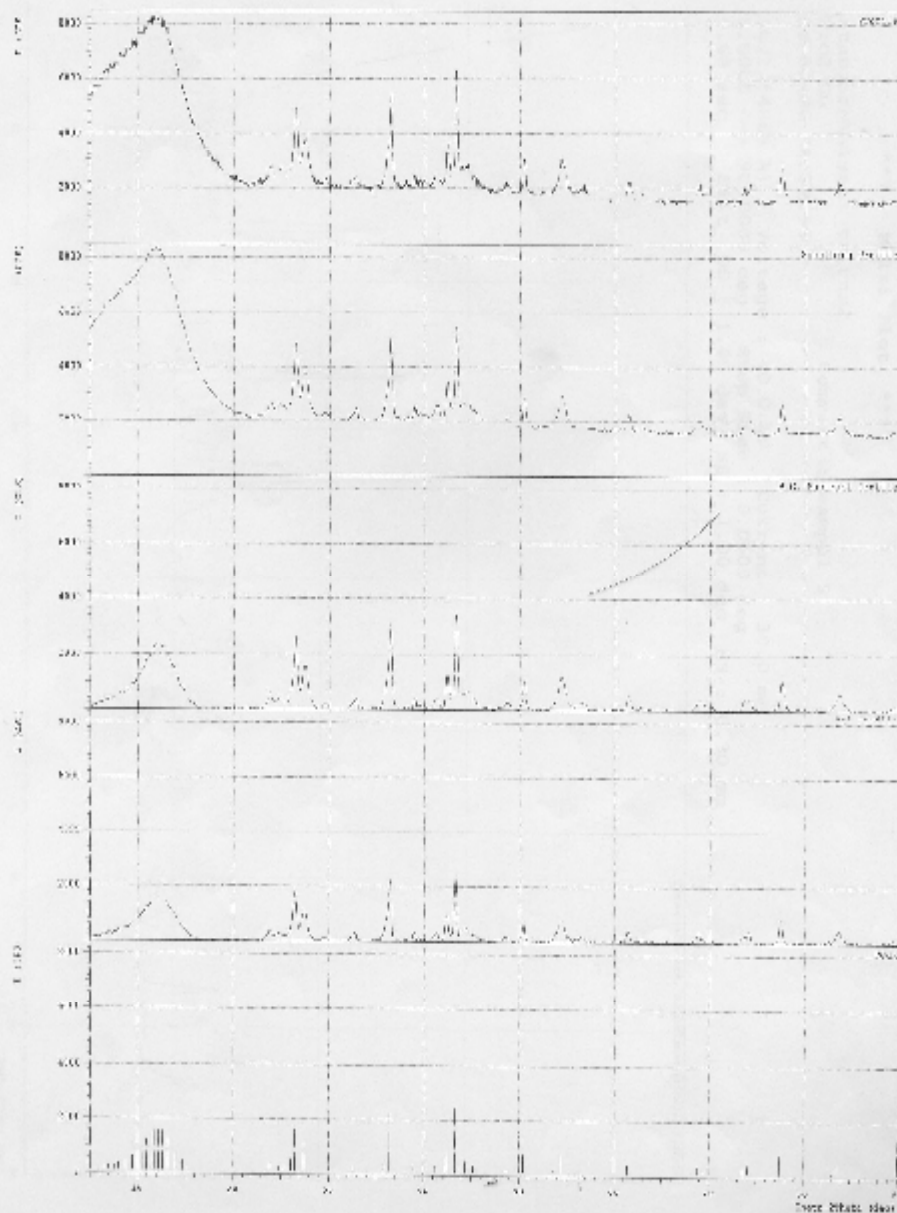
X-ray tube
target : Cu
voltage : 40.0 (kv)
current : 30.0 (mA)
Slits
divergence slit : 1.00 (deg)
scatter slit : 1.00 (deg)
receiving slit : 0.30 (mm)
Scanning
drive axis : Theta-2Theta
scan range : 5.0000 - 90.0000 (deg)
scan mode : Continuous Scan
scan speed : 5.0000 (deg/min)
sampling pitch : 0.0500 (deg)
preset time : 0.60 (sec)

Data Process Condition

Smoothing [AUTO]
smoothing points : 11
P.G.Subtraction [AUTO]
sampling points : 11
repeat times : 30
Kai-a2 Separate [MANUAL]
Kai a2 ratio : 50 (%)
Peak Search [AUTO]
differential points : 9
FWHM threshold : 0.050 (deg)
intensity threshold : 30 (cps mil)
FWHM ratio (n-1)/n : 2
System error Correction [NO]
Premise peak Correction [NO]

*** Basic Data Process ***

Group Name : STANDARD
 Data Name : slame1.tl1un82
 File Name : slame1.tr1un82.FK3
 Sample Name : TiO2/Cu
 Comment : sample 9



Lampiran 5
Pola Difraksi Sinar X Grafit/komposit TiO₂-SiO₂/Cu

Sample Name : TiO2-SiO2/Cu
Concentr : sampel 5

#	Strongest	3 peaks					
no.	peak	2Theta	d	I/I1	Peak	Intensity	Integrated Int
	no.	(deg)	(Å)		(deg)	(Counts)	(Counts)
1	24	26.3309	3.38251	100	0.53850	2039	28060
2	39	43.2954	2.00811	67	0.36790	1362	13363
3	12	12.5500	7.04754	48	0.00000	978	0

#	Peak	2Theta	d	I/I1	FWHM	Intensity	Integrated Int
	no.	(deg)	(Å)		(deg)	(Counts)	(Counts)
	1	5.8000	13.22544	4	0.39620	89	840
	2	6.3000	14.01815	6	0.60000	120	2488
	3	7.0000	12.61783	9	0.00000	184	0
	4	7.6000	11.62298	9	0.00000	175	0
	5	8.0500	10.97423	11	0.00000	223	0
	6	8.5000	10.39472	11	0.00000	233	0
	7	8.9500	9.87259	14	0.00000	261	0
	8	9.8000	9.01812	22	0.00000	443	0
	9	10.3500	8.54010	26	0.00000	524	0
	10	11.0500	8.00062	35	0.00000	722	0
	11	11.6500	7.58999	45	0.00000	920	0
	12	12.5500	7.04754	48	0.00000	978	0
	13	12.9000	6.85710	43	0.00000	871	0
	14	13.4000	6.60234	38	0.00000	774	0
	15	13.8000	6.41185	30	0.00000	608	0
	16	14.3000	6.18877	22	1.24700	449	9761
	17	15.3000	5.78616	9	0.58940	179	1094
	18	15.9000	5.56942	4	0.50000	88	999
	19	21.8480	4.06478	11	0.47700	222	2862
	20	23.1000	3.84721	8	0.41420	161	1914
	21	23.7423	3.74457	26	0.71990	524	9592
	22	24.7500	3.60150	18	0.00000	377	0
	23	25.5500	3.49030	21	0.00000	430	0
	24	26.3309	3.38251	100	0.53850	2039	28060
	25	27.3814	3.25460	41	0.34000	834	6060
	26	27.9500	3.19527	7	0.42300	188	1545
	27	28.4380	3.13653	6	0.32110	123	911
	28	31.4990	2.83794	3	0.27180	61	509
	29	32.4005	2.75502	4	0.38120	75	1094
	30	35.2000	2.54754	4	0.75460	89	1388
	31	35.5500	2.52328	4	0.00000	81	0
	32	36.1937	2.47935	19	0.59940	381	4811
	33	38.0689	2.36249	3	0.64640	70	1077
	34	38.9500	2.31947	10	0.46940	200	1636
	35	39.4000	2.28511	5	0.61000	96	1580
	36	41.2063	2.18902	8	0.50050	171	1366
	37	42.3500	2.13251	20	0.56660	401	6201
	38	43.2954	2.08811	67	0.36790	1362	13363
	39	43.6500	2.05951	19	0.00000	195	0
	40	44.4500	2.03531	20	0.00000	477	0
	41	45.2000	2.00445	10	0.78880	205	5771
	42	46.0500	1.96941	9	0.41260	92	1365
	43	48.6846	1.86381	3	0.32650	89	936

Peak No.	2 <th>theta (deg)</th> <th>d (Å)</th> <th>h k l</th> <th>FWHM (deg)</th> <th>Intensity (Counts)</th> <th>Integrated Int. (Counts)</th>	theta (deg)	d (Å)	h k l	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int. (Counts)
44	50.4224	1.80840	9	0.34110	392	3223	
45	54.3069	1.68737	22	0.35270	455	4434	
46	56.6371	1.62333	6	0.35080	114	1390	
47	59.8426	1.54438	3	0.54420	66	887	
48	60.5547	1.52735	4	0.32560	90	581	
49	61.2569	1.51197	4	0.24870	78	513	
50	62.7033	1.48052	4	0.25860	81	607	
51	68.9000	1.36171	9	0.47620	188	2158	
52	69.7787	1.34669	5	0.32080	92	626	
53	74.0734	1.27087	9	0.30440	193	2180	
54	76.9000	1.23878	3	0.28180	70	675	
55	77.4507	1.23132	24	0.43440	484	4403	
56	78.1564	1.22196	5	0.29100	112	798	
57	79.0500	1.21037	4	0.40000	72	732	
58	79.4000	1.20592	4	0.34380	78	492	
59	79.9389	1.19914	4	0.24210	73	598	
60	82.9000	1.16365	5	0.32500	94	1122	
61	83.5339	1.15643	13	0.49420	259	2497	
62	84.0500	1.15064	5	0.40000	96	1167	
63	88.3089	1.10681	3	0.32220	61	747	
64	89.5000	1.09415	4	0.36160	77	1607	

*** Basic Data Process ***

* Data Information

Group Name : standard
Data Name : siamel_trial01
File Name : siamel_trial01.RAW
Sample Name : TiO2-SiO2/Cu
Comment : sample 9
Date & Time : 12-01-06 08:10:19

Measurement Condition

X-ray tube

target : Cu
voltage : 40.0 (kv)
current : 30.0 (mA)

Slits

divergence slit : 1.00 (deg)
scatter slit : 1.00 (deg)
receiving slit : 0.30 (mm)

Scanning

drive axis : Theta-2Theta
scan range : 5.0000 - 90.0000 (deg)
scan mode : Continuous Scan
scan speed : 5.0000 (deg/min)
sampling pitch : 0.0500 (deg)
preset time : 0.60 (sec)

Data Process Condition

Smoothing [AUTO]

smoothing points : 11

B.G.Subtraction [AUTO]

sampling points : 11

repeat times : 30

Kal-a2 Separate [MANUAL]

Kal a2 ratio : 50 (%)

Peak Search [AUTO]

differential points : 11

FWHM threshold : 0.050 (deg)

intensity threshold : 20 (ps: m11)

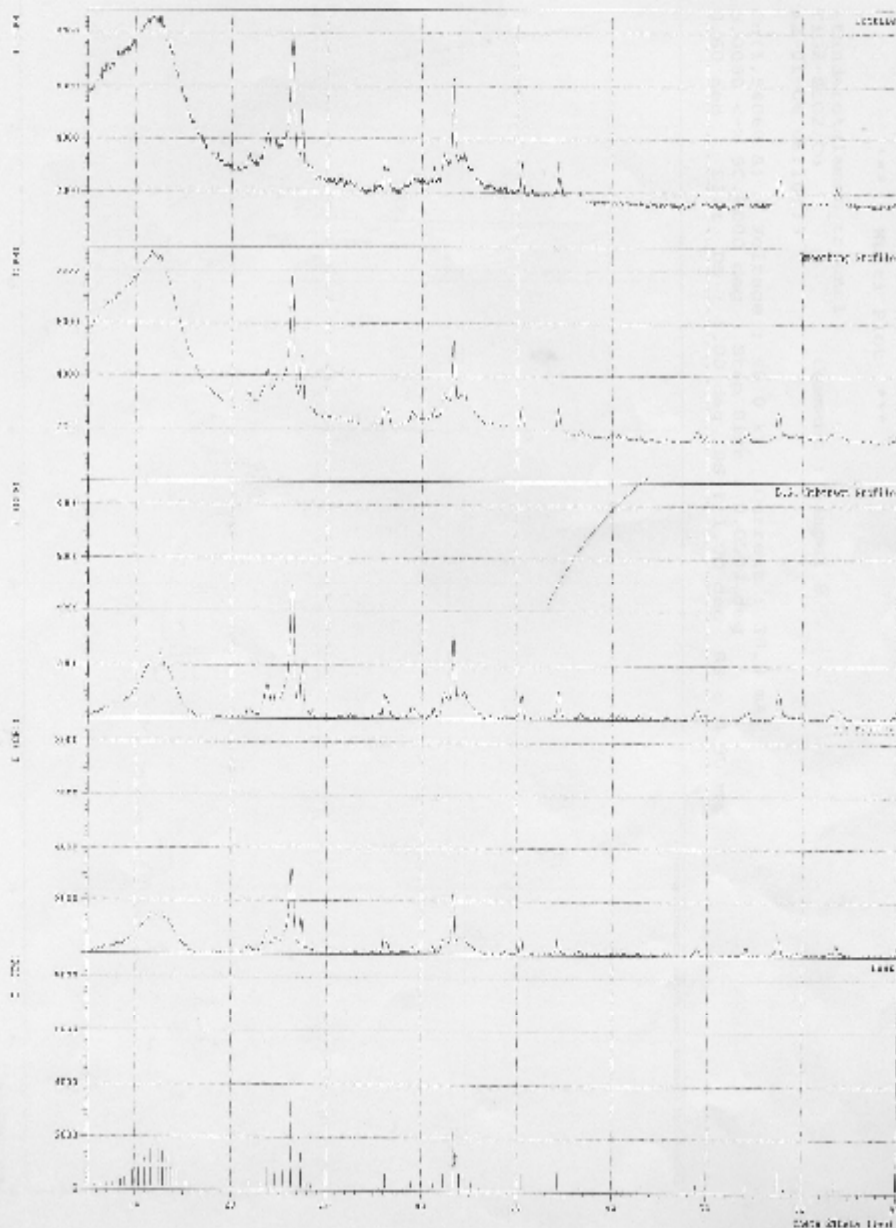
FWHM ratio (n-1)/n : 2

System error Correction [NO]

Precise peak Correction [NO]

*** Basic Data Process ***

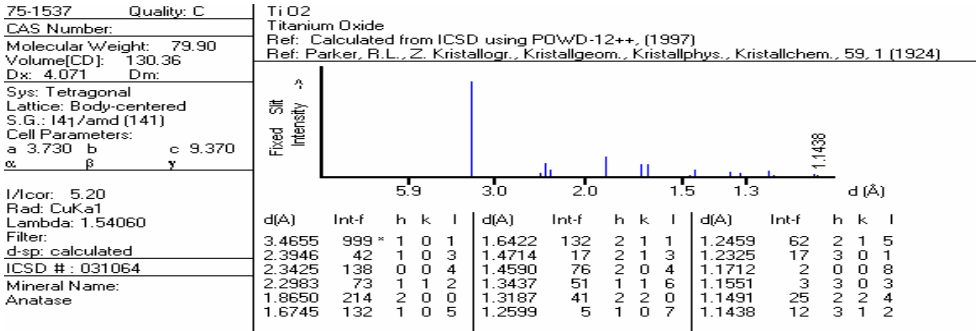
Group Name : standard
 Data Name : standard.LR10001
 File Name : standard.LR10001.PRR
 Sample Name : TiO2-SiO2/Cu
 Comment : sample 5



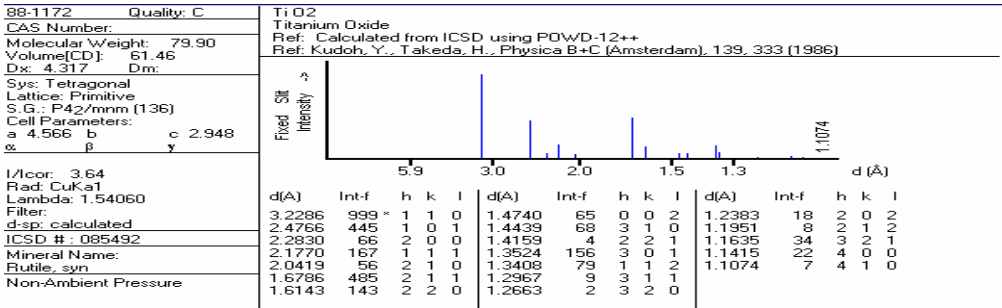
Lampiran 6

Pola Difraksi Sinar X pada Standar JCPDS TiO₂ anatase, TiO₂ rutil TiO₂-SiO₂, SiO₂, dan logam Cu

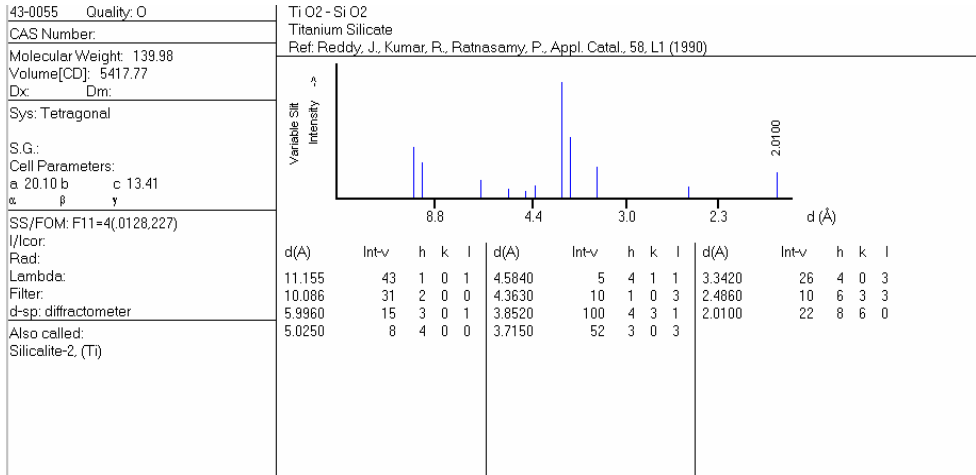
1. Pola Difraksi Sinar X Standar Anatase TiO₂



2. Pola Difraksi Sinar X Standar Rutil TiO₂



3. TiO₂-SiO₂ Standar



4. SiO₂ Standar

86-2364	Quality: C	Si O2
CAS Number:		Silicon Oxide
Molecular Weight: 60.08		Ref: Calculated from ICSD using POWD-12++
Volume[CD]: 2893.27		Ref: Fyfe, C.A et al., J. Phys. Chem., 94, 3718 (1990)
Dx: 1.931 Dm: 1.930		
Sys: Monoclinic		
Lattice: End-centered		
S.G.: C2/c (15)		
Cell Parameters:		
a 24.86 b 5.012 c 24.372		
α β 107.72 γ		
I/lor: 2.36		
Rad: CuKa1		
Lambda: 1.54060		
Filter:		
d-sp: calculated		
ICSD #: 040137		
Also called:		
Zeolite ZSM-12 (high silica, dehydrated) - artificia		

d(Å)	Int-v	h	k	l	d(Å)	Int-v	h	k	l	d(Å)	Int-v	h	k	l
11.841	48	2	0	0	4.6228	9	1	1	2	3.7820	3	3	1	2
11.608	61 *	0	0	2	4.4185	6	1	1	2	3.7204	3	3	1	4
9.9386	43	2	0	2	4.2315	100	3	1	0	3.6291	4	1	1	4
7.2582	4	2	0	2	4.1409	5	6	0	2	3.6291	4	4	0	4
5.9804	8	2	0	4	4.0480	4	2	0	6	3.5203	11	5	1	1
5.8039	9	0	0	4	4.0480	4	3	1	1	3.5203	11	5	1	2
4.9693	0	4	0	4	3.9974	1	3	1	3	3.4813	3	1	1	5
4.9037	0	1	1	0	3.9472	10	6	0	0	3.4813	3	3	1	3
4.8602	0	1	1	1	3.8693	30	0	0	6	3.4426	20	5	1	0
4.7243	12	1	1	1	3.8693	30	1	1	4	3.4426	20	5	1	3
4.7243	12	4	0	2	3.8548	27	6	0	4	3.4174	4	3	1	5
4.6791	5	2	0	4	3.8139	33	4	0	6	3.3862	19	2	0	6

5. Pola Difraksi Sinar X Standar Logam Cu

03-1018	(Deleted)	Cu
CAS Number:		Copper
Molecular Weight: 63.55		Ref: Allis-Chalmers Mfg. Co, Private Communication
Volume[CD]: 46.96		
Dx: 8.989 Dm: 8.950		
Sys: Cubic		
Lattice: Face-centered		
S.G.: Fm3m (225)		
Cell Parameters:		
a 3.607 b c		
α β γ		
SS/FOM: F 4=3(0.276, 5)		
I/lor:		
Rad: FeKa1		
Lambda: 1.93597		
Filter:		
d-sp:		

d(Å)	Int-v	h	k	l	d(Å)	Int-v	h	k	l	d(Å)	Int-v	h	k	l
2.0800	58	1	1	1	1.2700	86				1.0400	82	2	2	2
1.8000	47	2	0	0	1.0900	100	3	1	1					

Lampiran 7
Perhitungan Rasio Anatase Rutil, Rasio TiO₂ anatase- SiO₂,
Ratio TiO₂ rutil- SiO₂

1. Material semikonduktor grafit/TiO₂/Cu

Tabel Lampiran 1. Perhitungan Rasio Anatase Rutil Grafit/TiO₂/Cu

	I count anatase pada 2θ= 77	I count rutil pada 2θ = 43	Rasio Anatase Rutil
Hasil sintesis	37	44	0,84
Handayani (2006)	51	81	0,69

2. Material semikonduktor grafit/komposit TiO₂- SiO₂/Cu

Tabel Lampiran 2. Perhitungan Rasio Anatase Rutil, Anatase - SiO₂, dan Rutil - SiO₂ Grafit/komposit TiO₂- SiO₂/Cu

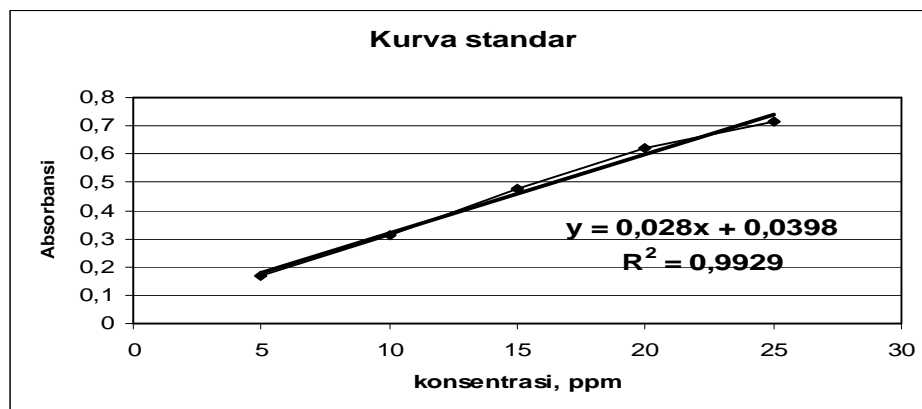
	I count anatase (2θ= 77)	I count rutil (2θ = 27)	I count SiO ₂ (2θ = 26)	Rasio Anatas e Rutil	Rasio Anatase - SiO ₂	Rasi o Rutil - SiO ₂
Hasil sintesis	24	41	100	0,585	0,24	0,41
Wibowo (2006)	23	39	100	0,589	0,23	0,39

Lampiran 8
Kurva Standar Larutan Zat Warna *Remazol Yellow FG*

1. Kurva Standar I

Tabel Lampiran 3. Pengukuran Kurva Standar I

Konsentrasi (ppm)	Absorbansi			
	A1	A2	A3	A rata2
5	0,171	0,169	0,17	0,17
10	0,315	0,314	0,315	0,31466667
15	0,476	0,475	0,474	0,475
20	0,623	0,62	0,622	0,62166667
25	0,716	0,716	0,716	0,716

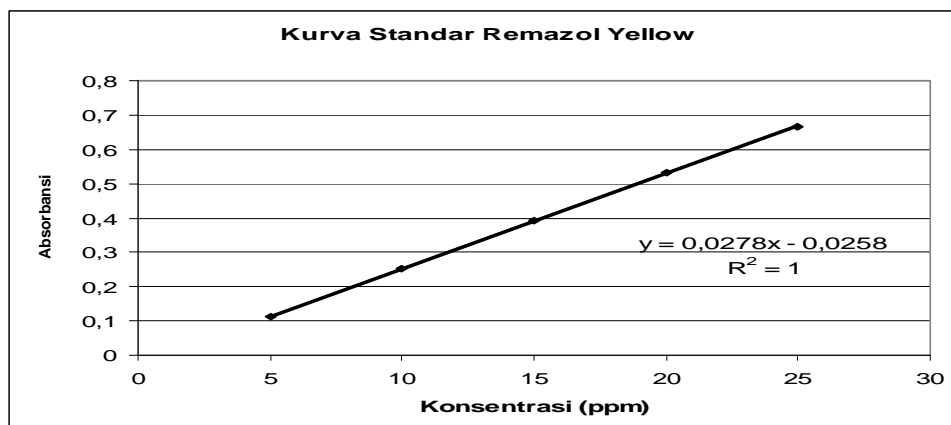


Gambar Lampiran 1. Kurva Standar I

2. Kurva Standar II

Tabel Lampiran 4. Pengukuran Kurva Standar II

Konsentrasi (ppm)	Absorbansi			
	A1	A2	A3	A rata2
5	0,113	0,112	0,111	0,112
10	0,253	0,254	0,251	0,25266667
15	0,391	0,392	0,392	0,39166667
20	0,532	0,531	0,532	0,53166667
25	0,667	0,668	0,667	0,66733333

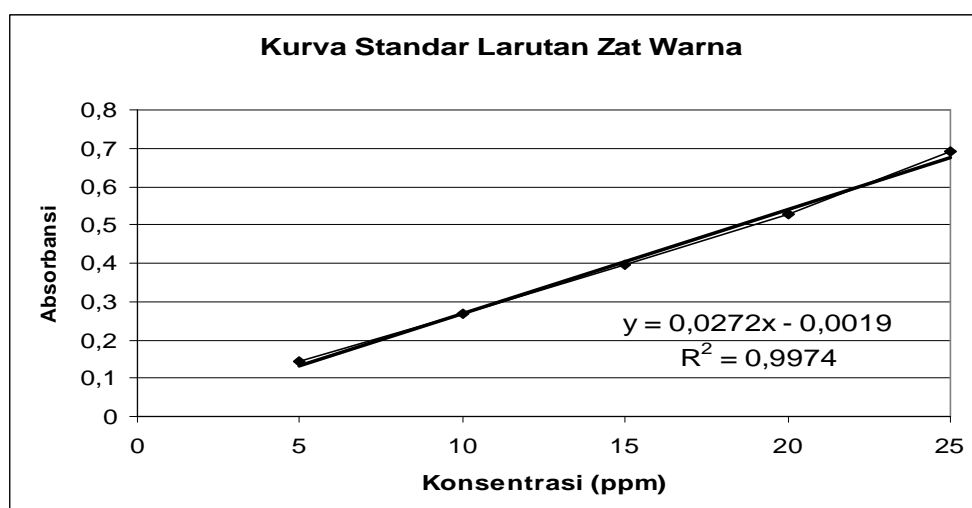


Gambar Lampiran 2. Kurva Standar II

3. Kurva Standar tanggal III

Tabel Lampiran 5. Pengukuran Kurva Standar III

Konsentrasi (ppm)	Absorbansi			
	A1	A2	A3	A rata2
5	0,145	0,143	0,142	0,1433333
10	0,265	0,267	0,267	0,2663333
15	0,397	0,395	0,4	0,3973333
20	0,527	0,531	0,531	0,5296667
25	0,692	0,69	0,69	0,6906667

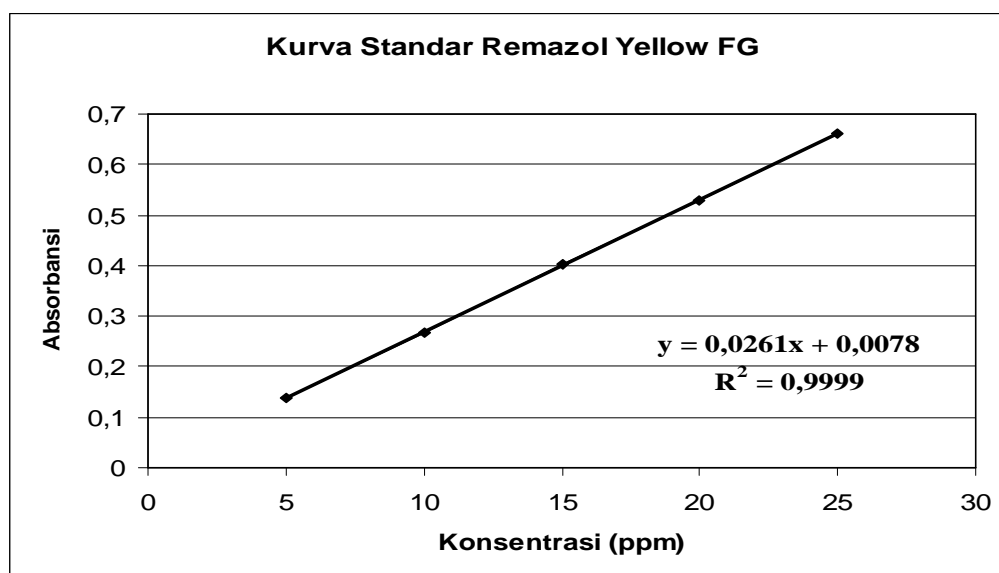


Gambar Lampiran 3. Kurva Standar III

4. Kurva Standar IV

Tabel Lampiran 6. Pengukuran Kurva Standar IV

Konsentrasi (ppm)	Absorbansi			
	A1	A2	A3	A rata2
5	0,139	0,139	0,138	0,13866667
10	0,267	0,267	0,267	0,267
15	0,403	0,403	0,403	0,403
20	0,529	0,529	0,528	0,52866667
25	0,661	0,661	0,661	0,661



Gambar Lampiran 4. Kurva Standar IV

Lampiran 9
Data Penurunan Absorbansi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Material Semikonduktor Grafit/TiO₂, Grafit/TiO₂/Cu, Grafit/komposit TiO₂-SiO₂, Grafit/ komposit TiO₂-SiO₂/Cu Tanpa Sinar Dan Tanpa Arus (Absorbsi)

Tabel Lampiran 7. Data Absorbsi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/TiO₂

Material 1 = grafit/TiO₂ ; berat 0,044 g (grafit+TiO₂) dari 0,041 g (grafit)

Material 2 = grafit/TiO₂ ; berat 0,049 g (grafit+TiO₂) dari 0,046 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y 2)	konsentrasi 1	konsentrasi 2	kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,5396667	0,5396667	20,34052878	20,34052878	20,34052878	0
20	0,5153333	0,5226667	19,46522662	19,72901799	19,5971223	0,186528664
40	0,5163333	0,5203333	19,50119784	19,64508273	19,57314029	0,101741983
60	0,516	0,513	19,48920863	19,38129496	19,4352518	0,076306487
80	0,526	0,5103333	19,84892086	19,2853705	19,56714568	0,398490281
100	0,524	0,5076667	19,77697842	19,18944964	19,48321403	0,415445582
120	0,521	0,5076667	19,66906475	19,18944964	19,42925719	0,339139095
140	0,5176667	0,5076667	19,54916187	19,18944964	19,36930576	0,254354957
160	0,518	0,5063333	19,56115108	19,14148561	19,35131835	0,296748298
180	0,516	0,5033333	19,48920863	19,03357194	19,26139029	0,322183794
200	0,5106667	0,503	19,29736331	19,02158273	19,15947302	0,195006315
220	0,5033333	0,4963333	19,03357194	18,78177338	18,90767266	0,17804847
240	0,5026667	0,4956667	19,00959353	18,75779496	18,88369424	0,17804847

Keterangan : Slope (b) = 0,0278

Intercept (a) = 0,0258

Persamaan Regresi Linier : $y = 0,0278x - 0,0258$

Tabel Lampiran 8. Data Absorbsi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/TiO₂/Cu

Material 1 = grafit/TiO₂/Cu ; berat 0,066 g (grafit+TiO₂+Cu) dari 0,056 g (grafit+TiO₂) dari 0,053 g (grafit)

Material 2 = grafit/TiO₂/Cu ; berat 0,057 g (grafit+TiO₂+Cu) dari 0,053 g (grafit+TiO₂) dari 0,050 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y 2)	konsentrasi 1	konsentrasi 2	kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,5396667	0,5396667	20,34052878	20,34052878	20,34052878	0
20	0,5066667	0,5093333	19,15347842	19,24939928	19,20143885	0,067826293
40	0,5006667	0,5106667	18,93765108	19,29736331	19,11750719	0,254354957
60	0,4993333	0,506	18,88968705	19,1294964	19,00959173	0,169570819
80	0,4993333	0,5026667	18,88968705	19,00959353	18,94964029	0,084786681
100	0,4963333	0,4983333	18,78177338	18,85371583	18,8177446	0,050870991
120	0,4916667	0,4926667	18,61391007	18,64988129	18,63189568	0,025435496
140	0,4926667	0,4923333	18,64988129	18,63788849	18,64388489	0,008480194
160	0,4893333	0,4916667	18,52997482	18,61391007	18,57194245	0,059351186
180	0,488	0,4883333	18,48201439	18,4940036	18,48800899	0,008477651
200	0,488	0,4886667	18,48201439	18,5059964	18,4940054	0,016957845
220	0,4813333	0,4783333	18,24220504	18,13429137	18,1882482	0,076306487
240	0,4806667	0,4776667	18,21822662	18,11031295	18,16426978	0,076306487

Keterangan : Slope (b) = 0,0278

Intercept (a) = 0,0258

Persamaan Regresi Linier : $y = 0,0278x - 0,0258$

Tabel Lampiran 9. Data Absorbsi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/ komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

Material 1 = grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$; berat 0,064 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$) dari 0,060 g (grafit)

Material 2 = grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$; berat 0,065 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$) dari 0,060 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y 2)	konsentrasi 1	konsentrasi 2	konsentrasi rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,555	0,5596667	20,965517	21,05995324	21,01273524	0,066776333
20	0,518333333	0,5356667	19,56066411	20,19664388	19,878654	0,44970561
40	0,523	0,534333	19,7394636	20,14866906	19,94406633	0,289351958
60	0,513	0,534333	19,35632184	20,14866906	19,75249545	0,560274096
80	0,515666667	0,531	19,45849298	20,02877698	19,74363498	0,403251685
100	0,512333333	0,527	19,33077905	19,88489209	19,60783557	0,391817082
120	0,502666667	0,525	18,96040868	19,81294964	19,38667916	0,602837491
140	0,497333333	0,523	18,75606641	19,74100719	19,2485368	0,696458307
160	0,491	0,517333	18,51340996	19,53715827	19,02528412	0,723899373
180	0,471666667	0,5146667	17,77266922	19,4412482	18,60695871	1,179863512
200	0,462333333	0,514333	17,41507024	19,4292446	18,42215742	1,42423635
220	0,46	0,512	17,3256705	19,34532374	18,33549712	1,428110504
240	0,475	0,5056667	17,90038314	19,11750719	18,50894517	0,860636671

Keterangan : Slope₁ (b) = 0,0261

Intercept₁ (a) = 0,0078

Persamaan Regresi Linier (1) : $y = 0,0261x + 0,0078$

Slope₂ (b) = 0,0278

Intercept₂ (a) = 0,0258

Persamaan Regresi Linier (2) : $y = 0,0278x - 0,0258$

Tabel Lampiran 10. Data Absorbansi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/ komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{/Cu}$

Material 1 = berat 0,053 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{+Cu}$); dari 0,050 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$); dari 0,047 g (grafit)

Material 2 = berat 0,060 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{+Cu}$); dari 0,058 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$); dari 0,056 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y 2)	konsentrasi 1	konsentrasi2	kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,5493333	0,5493333	20,6882482	20,6882482	20,6882482	0
20	0,439	0,4466667	16,71942446	16,995205	16,85731475	0,195006315
40	0,461	0,50533	17,51079137	19,1053957	18,30809353	1,127555526
60	0,469	0,500333	17,79856115	18,9256475	18,36210432	0,796970388
80	0,468	0,501333	17,76258993	18,9616187	18,36210432	0,847841379
100	0,466667	0,5006667	17,71464029	18,9376511	18,32614568	0,864799224
120	0,468667	0,5016667	17,78658273	18,9736223	18,38010252	0,839363728
140	0,466667	0,497333	17,71464029	18,8177338	18,26618705	0,780004912
160	0,4686667	0,495	17,78657194	18,7338129	18,26019245	0,66980054
180	0,467333	0,493333	17,73859712	18,6738489	18,20622302	0,661322889
200	0,4716667	0,485333	17,89448561	18,3860791	18,14028237	0,347609115
220	0,4386667	0,4484	16,70743525	17,057554	16,8824946	0,247571311
240	0,476333	0,4833	18,06233813	18,3129496	18,18764388	0,177209099

Keterangan : Slope (b) = 0,0278
Intercept (a) = 0,0258
Persamaan Regresi Linier : $y = 0,0278x - 0,0258$

Tabel Lampiran 11. Data Absorbsi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit Kosong

Material = grafit ; berat : 0,051 g dan 0,064 g

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y1)	Absorbansi (y2)	konsentrasi 1	konsentrasi 2	Kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,553	0,553	20,82014388	20,8201439	20,820144	0
20	0,5373333	0,5446667	20,25659353	20,5203849	20,388489	0,186528664
40	0,541	0,543	20,38848921	20,4604317	20,42446	0,050870991
60	0,5393333	0,5423333	20,32853597	20,4364496	20,382493	0,076306487
80	0,5386667	0,5406667	20,30455755	20,3765	20,340529	0,050870991
100	0,5386667	0,5336667	20,30455755	20,1247014	20,214629	0,127177479
120	0,5296667	0,5346667	19,98081655	20,1606727	20,070745	0,127177479
140	0,5303333	0,538	20,00479496	20,2805755	20,142685	0,195006315
160	0,5303333	0,5366667	20,00479496	20,2326151	20,118705	0,161093169
180	0,5313333	0,5366667	20,04076619	20,2326151	20,136691	0,135657673
200	0,5346667	0,533	20,16067266	20,1007194	20,130696	0,042393341
220	0,5293333	0,5353333	19,96882374	20,1846511	20,076737	0,152612974
240	0,532	0,537	20,0647482	20,2446043	20,154676	0,127177479

Keterangan : Slope (b) = 0,0278

Intercept (a) = 0,0258

Persamaan Regresi Linier : $y = 0,0278x - 0,0258$

Lampiran 10
**Data Penurunan Absorbansi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Material Semikonduktor Grafit/TiO₂,
 Grafit/TiO₂/Cu, Grafit/komposit TiO₂-SiO₂, Grafit/ komposit TiO₂-SiO₂/Cu dengan Sinar UV (Fotodegradasi)**

Tabel Lampiran 12. Data Fotodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/TiO₂

Fotodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* dengan lampu UV 6 Watt ($\lambda=254$ nm)

Material 1 = grafit/TiO₂ ; berat 0,049 g (grafit+TiO₂) dari 0,047 g (grafit)

Material 2 = grafit/TiO₂ ; berat 0,050 g (grafit+TiO₂) dari 0,047 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y 2)	konsentrasi 1	konsentrasi2	kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,586666667	0,586666667	19,53095238	19,5309524	19,53095238	0
20	0,568333333	0,568	18,87619048	18,8642857	18,8702381	0,008417938
40	0,561333333	0,560666667	18,62619048	18,602381	18,61428571	0,016835876
60	0,555333333	0,555	18,41190476	18,4	18,40595238	0,008417938
80	0,546666667	0,547333333	18,10238095	18,1261905	18,11428571	0,016835876
100	0,541666667	0,541333333	17,92380952	17,9119048	17,91785714	0,008417938
120	0,541	0,540333333	17,9	17,8761905	17,88809524	0,016835876
140	0,536666667	0,537	17,7452381	17,7571429	17,75119048	0,008417938
160	0,535	0,534333333	17,68571429	17,6619048	17,67380952	0,016835876

Keterangan : Slope (b) = 0,028

Intercept (a) = 0,0398

Persamaan Regresi Linier : $y = 0,028x + 0,0398$

Tabel Lampiran 13. Data Fotodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/TiO₂/Cu

Fotodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* dengan lampu UV 6 Watt ($\lambda = 254$ nm)

Material 1 = grafit/TiO₂/Cu ; berat 0,056 g (grafit+TiO₂+Cu) dari 0,050 g (grafit+TiO₂) dari 0,045 g (grafit)

Material 2 = grafit/TiO₂/Cu ; berat 0,050 g (grafit+TiO₂+Cu) dari 0,047 g (grafit+TiO₂) dari 0,045 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y 2)	konsentrasi 1	konsentrasi2	kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,58333333	0,58333333	19,41190464	19,4119048	19,4119047	0
20	0,56	0,561666667	18,57857143	18,6380952	18,60833333	0,042089689
40	0,53733333	0,541333333	17,7690475	17,9119048	17,84047613	0,101015339
60	0,53033333	0,53	17,5190475	17,5071429	17,51309518	0,008417854
80	0,532	0,526333333	17,57857143	17,3761905	17,47738095	0,143104944
100	0,529	0,523333333	17,57857143	17,3761905	17,47738095	0,143104944
120	0,52433333	0,520666667	17,47142857	17,2690476	17,3702381	0,143104944
140	0,52266667	0,518333333	17,30476179	17,1738095	17,23928565	0,092597232
160	0,51866667	0,516333333	17,24523821	17,0904762	17,1678572	0,109433277

Keterangan : Slope (b) = 0,028

Intercept (a) = 0,0398

Persamaan Regresi Linier : $y = 0,028x + 0,0398$

Tabel Lampiran 14. Data Fotodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

Fotodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* dengan lampu UV 6 Watt ($\lambda = 254 \text{ nm}$)

Material 1 = grafit/ $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$; berat 0,050 g (grafit+ $\text{TiO}_2\text{+SiO}_2$) dari 0,048 g (grafit)

Material 2 = grafit/ $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$; berat 0,056 g (grafit+ $\text{TiO}_2\text{+SiO}_2$) dari 0,053 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y 2)	konsentrasi 1	konsentrasi2	kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,554333333	0,554333333	20,4497549	20,4497549	20,4497549	0
20	0,533	0,54	19,66544118	19,9227941	19,79411765	0,18197601
40	0,528	0,527	19,48161765	19,4448529	19,46323529	0,025996573
60	0,512666667	0,513666667	18,91789216	18,9546569	18,93627451	0,025996573
80	0,507666667	0,504333333	18,73406863	18,6115196	18,67279412	0,086655243
100	0,5	0,498666667	18,45220588	18,4031863	18,42769608	0,034662097
120	0,494333333	0,489333333	18,24387255	18,060049	18,15196078	0,129982864
140	0,482666667	0,484666667	17,6752451	17,7487745	17,7120098	0,051993146
160	0,48	0,480333333	17,57720588	17,5894608	17,58333333	0,008665524

Keterangan : Slope (b) = 0,0272

Intercept (a) = 0,0019

Persamaan Regresi Linier : $y = 0,0272x - 0,0019$

Tabel Lampiran 15. Data Fotodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{Cu}$

Fotodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* dengan lampu UV 6 Watt ($\lambda = 254 \text{ nm}$)

Material 1 = berat 0,051 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{+Cu}$); dari 0,046 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$); dari 0,048 g (grafit)

Material 2 = berat 0,061 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{+Cu}$); dari 0,058 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$); dari 0,055 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y 2)	konsentrasi 1	konsentrasi2	kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,554333333	0,554333333	20,4497549	20,4497549	20,4497549	0
20	0,530666667	0,530333333	19,57965686	19,567402	19,57352941	0,008665524
40	0,511333333	0,512	18,86887255	18,8933824	18,88112745	0,017331049
60	0,485	0,486666667	17,90073529	17,9620098	17,93137255	0,043327621
80	0,483333333	0,484666667	17,83946078	17,8884804	17,86397059	0,034662097
100	0,48	0,479	17,71691176	17,6801471	17,69852941	0,025996573
120	0,478	0,476666667	17,64338235	17,5943627	17,61887255	0,034662097
140	0,474	0,477333333	17,35661765	17,4791667	17,41789216	0,086655243
160	0,472666667	0,474666667	17,30759804	17,3811275	17,34436275	0,051993146

Keterangan : Slope (b) = 0,0272

Intercept (a) = 0,0019

Persamaan Regresi Linier : $y = 0,0272x - 0,0019$

Lampiran 11
**Data Penurunan Absorbansi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Material Semikonduktor Grafit/TiO₂,
 Grafit/TiO₂/Cu, Grafit/komposit TiO₂-SiO₂, Grafit/ komposit TiO₂-SiO₂/Cu dengan Arus Saja (Elektrodegradasi)**

Tabel Lampiran 16. Data Elektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/TiO₂

Elektrodegradasi menggunakan *Power Supply* (12 V, 500 mA)

Material 1 = grafit/TiO₂ ; berat 0,046 g (grafit+TiO₂) dari 0,045 g (grafit) Material 2 = grafit/TiO₂ ; berat 0,057 g (grafit+TiO₂) dari 0,046 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y 2)	konsentrasi 1	konsentrasi 2	kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,54633	0,555	20,580216	20,9655172	20,77286653	0,272449243
20	0,519	0,542	19,597122	20,467433	20,03227763	0,615402561
40	0,430333	0,506333333	16,407662	19,100894	17,75427793	1,9044027
60	0,396333	0,452666667	15,18464	17,0446999	16,11467008	1,315260746
80	0,3826667	0,436	14,693047	16,4061303	15,54958852	1,211332964
100	0,371	0,433	14,273381	16,2911877	15,28228452	1,42680462
120	0,35833	0,409666667	13,817626	15,3971903	14,6074081	1,116920695
140	0,34933	0,375	13,493885	14,0689655	13,7814252	0,40664341
160	0,345333	0,31	13,350108	11,5785441	12,46432599	1,252684813
180	0,3376667	0,312	13,074342	11,6551724	12,36475707	1,003504245
200	0,325333	0,303	12,630683	11,3103448	11,97051414	0,933620396
220	0,317333	0,297333333	12,342914	11,0932312	11,71807242	0,883658975
240	0,2826667	0,29	11,095924	10,8122605	10,9540925	0,200580684

Keterangan : Slope₁ (b) = 0,0261

Intercept₁ (a) = 0,0078

Persamaan Regresi Linier (1) : $y = 0,0261x + 0,0078$

Slope₂ (b) = 0,0278

Intercept₂ (a) = 0,0258

Persamaan Regresi Linier (2) : $y = 0,0278x - 0,0258$

Tabel Lampiran 17. Data Elektrodgradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/TiO₂/Cu

Elektrodgradasi menggunakan *Power Supply* (12 V, 500 mA)

Material 1 = grafit/TiO₂/Cu ; berat 0,054 g (grafit+TiO₂+Cu) dari 0,052 g (grafit+TiO₂) dari 0,050 g (grafit)

Material 2 = grafit/TiO₂/Cu ; berat 0,055 g (grafit+TiO₂+Cu) dari 0,053 g (grafit+TiO₂) dari 0,050 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y 2)	konsentrasi 1	konsentrasi 2	kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,5373333	0,5373333	20,25659353	20,2565935	20,25659353	0
20	0,4106667	0,4556667	15,70024101	17,318946	16,50959353	1,144597308
40	0,328	0,3723333	12,72661871	14,3213417	13,52398022	1,127639463
60	0,301	0,341	11,75539568	13,1942446	12,47482014	1,017419829
80	0,2813333	0,329	11,04796043	12,7625899	11,90527518	1,212426144
100	0,27	0,3196667	10,64028777	12,4268597	11,53357374	1,263297136
120	0,253	0,3063333	10,02877698	11,947241	10,98800899	1,356558924
140	0,25	0,295	9,920863309	11,5395683	10,73021583	1,144597308
160	0,2486667	0,2766667	9,872902878	10,8800971	10,3765	0,71219388
180	0,2503333	0,2653333	9,932852518	10,4724209	10,20263669	0,381532436
200	0,2423333	0,26	9,645082734	10,2805755	9,962829137	0,449361272
220	0,2416667	0,2523333	9,621104317	10,004795	9,81294964	0,271310259
240	0,2423333	0,2556667	9,645082734	10,1247014	9,884892086	0,339141639

Keterangan : Slope (b) = 0,0278

Intercept (a) = 0,0258

Persamaan Regresi Linier : $y = 0,0278x - 0,0258$

Tabel Lampiran 18. Data Elektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

Elektrodegradasi menggunakan *Power Supply* (12 V, 500 mA)

Material 1 = grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$; berat 0,062 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$) dari 0,058 g (grafit)

Material 2 = grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$; berat 0,055 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$) dari 0,053 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y 2)	konsentrasi 1	Konsentrasi 2	Kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,555	0,539333333	20,892086	20,36526181	20,62867407	0,372521189
20	0,5096667	0,465333333	19,261392	17,53001277	18,39570243	1,224270054
40	0,4646667	0,388333333	17,642687	14,5798212	16,11125413	2,165773212
60	0,4566667	0,393	17,354917	14,75862069	16,05676898	1,835858915
80	0,4443333	0,379333333	16,91127	14,23499361	15,5731317	1,892413028
100	0,4356667	0,372333333	16,599522	13,96679438	15,28315798	1,861619258
120	0,423	0,368	16,143885	13,80076628	14,97232559	1,656835057
140	0,42	0,345666667	16,035971	12,94508301	14,49052712	2,185588012
160	0,4136667	0,334	15,808155	12,49808429	14,15311948	2,340573215
180	0,391	0,325666667	14,992806	12,17879949	13,58580262	1,989802913
200	0,382	0,315	14,669065	11,77011494	13,21958985	2,049867066
220	0,3666667	0,306666667	14,117507	11,45083014	12,78416867	1,885625428
240	0,3616667	0,305	13,937651	11,38697318	12,66231213	1,803601639

Keterangan : Slope₁ (b) = 0,0261

Intercept₁ (a) = 0,0078

Persamaan Regresi Linier (1) : $y = 0,0261x + 0,0078$

Slope₂ (b) = 0,0278

Intercept₂ (a) = 0,0258

Persamaan Regresi Linier (2) : $y = 0,0278x - 0,0258$

: Tabel Lampiran 19. Data Elektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/komposit TiO₂- SiO₂/Cu

Elektrodegradasi menggunakan *Power Supply* (12 V, 500 mA)

Material 1 = berat 0,058 g (grafit+komposit TiO₂.SiO₂+Cu); dari 0,053 g (grafit+komposit TiO₂.SiO₂);dari 0,050 g (grafit)

Material 2 = berat 0,050 g (grafit+komposit TiO₂.SiO₂+Cu); dari 0,048 g (grafit+komposit TiO₂.SiO₂);dari 0,045 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

Waktu (menit)	Absorbansi (y1)	Absorbansi (y2)	konsentrasi 1	Konsentrasi 2	kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,5233333	0,539333333	19,752996	20,365262	20,05912911	0
20	0,515	0,518	19,453237	19,5478927	19,50056507	0,432937024
40	0,381	0,498	14,633094	18,7816092	16,70735136	0,066931412
60	0,3586667	0,365	13,829737	13,6858238	13,75778058	2,933443562
80	0,329	0,339333333	12,76259	12,7024266	12,73250825	0,101762322
100	0,324	0,313	12,582734	11,6934866	12,1381102	0,042541922
120	0,3073333	0,295666667	11,983212	11,0293742	11,50629322	0,628792741
140	0,2946667	0,285333333	11,527579	10,633461	11,08052009	0,674465338
160	0,2913333	0,274333333	11,407673	10,2120051	10,80983889	0,632236964
180	0,2843333	0,267666667	11,155874	9,95657727	10,55622568	0,845464635
200	0,236	0,278666667	9,4172662	10,3780332	9,897649696	0,848030924
220	0,231	0,267666667	9,2374101	9,95657727	9,596993669	0,679364874
240	0,2243333	0,265333333	8,9976007	9,86717752	9,432389121	0,508528

Keterangan : Slope₁ (b) = 0,0261

Intercept₁ (a) = 0,0078

Persamaan Regresi Linier (1) : $y = 0,0261x + 0,0078$

Slope₂ (b) = 0,0278

Intercept₂ (a) = 0,0258

Persamaan Regresi Linier (2) : $y = 0,0278x - 0,0258$

Tabel Lampiran 20. Data Elektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit Kosong

Material = grafit berat : 0,055 g dan 0.055 g

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y1)	Absorbansi (y2)	konsentrasi 1	konsentrasi 2	kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,553	0,553	20,82014388	20,8201439	20,820144	0
20	0,4586667	0,4566667	17,42685971	17,3549173	17,390888	0,050870991
40	0,463	0,4763333	17,58273381	18,0623489	17,822541	0,339139095
60	0,4473333	0,4633333	17,01918345	17,594723	17,306953	0,406967932
80	0,466	0,4356667	17,69064748	16,5995216	17,145085	0,771542523
100	0,4403333	0,4366667	16,76738489	16,6354928	16,701439	0,093261789
120	0,4353333	0,435	16,58752878	16,5755396	16,581534	0,008477651
140	0,4353333	0,4353333	16,58752878	16,5875288	16,587529	0
160	0,4346667	0,433	16,56355036	16,5035971	16,533574	0,042393341
180	0,434	0,4493333	16,53956835	17,0911259	16,815347	0,390010087
200	0,4176667	0,4283333	15,95203957	16,3357302	16,143885	0,271310259
220	0,4166667	0,4103333	15,91606835	15,6882482	15,802158	0,161093169
240	0,4156667	0,41	15,88009712	15,676259	15,778178	0,144135324

Keterangan : Slope (b) = 0,0278

Intercept (a) = 0,0258

Persamaan Regresi Linier : $y = 0,0278x - 0,0258$

Lampiran 12
**Data Penurunan Absorbansi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Material Semikonduktor Grafit/TiO₂,
 Grafit/TiO₂/Cu, Grafit/komposit TiO₂-SiO₂, Grafit/ komposit TiO₂-SiO₂/Cu dengan Arus dan Sinar UV (Fotoelektrodegradasi UV)**

Tabel Lampiran 21. Data Fotoelektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/TiO₂

Fotoelektrodegradasi menggunakan *Power Supply* (12 V, 500 mA) dan lampu UV 6 Watt ($\lambda = 254$ nm)

Material 1 = grafit/TiO₂ ; berat 0,050 g (grafit+TiO₂) dari 0,047 g (grafit) Material 2 = grafit/TiO₂ ; berat 0,049 g (grafit+TiO₂) dari 0,047 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y 2)	konsentrasi 1	konsentrasi 2	Kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,54633	0,551333333	20,580216	20,8250319	20,70262388	0,173111125
20	0,5113333	0,55	19,321342	20,7739464	20,04764404	1,027146587
40	0,455333	0,544	17,306942	20,5440613	18,92550187	2,288988695
60	0,422	0,54	16,107914	20,3908046	18,24935913	3,028461219
80	0,4326667	0,54	16,491608	20,3908046	18,44120626	2,757148416
100	0,385	0,454	14,776978	17,0957854	15,93638193	1,63964417
120	0,3646667	0,41	14,045565	15,4099617	14,72776322	0,964774327
140	0,3536667	0,393666667	13,649881	14,7841635	14,21702238	0,80205862
160	0,3386667	0,367	13,110313	13,7624521	13,43638253	0,461132021
180	0,329333	0,337666667	12,774568	12,6385696	12,70656897	0,096165632
200	0,319667	0,321333333	12,426871	12,0127714	12,21982095	0,29281229
220	0,305333	0,302	11,911259	11,2720307	11,59164482	0,452002695
240	0,3026667	0,282	11,815349	10,5057471	11,16054802	0,926028309

Keterangan : Slope₁ (b) = 0,0261

Intercept₁ (a) = 0,0078

Persamaan Regresi Linier (1) : $y = 0,0261x + 0,0078$

Slope₂ (b) = 0,0278

Intercept₂ (a) = 0,0258

Persamaan Regresi Linier (2) : $y = 0,0278x - 0,0258$

Tabel Lampiran 22. Data Fotoelektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/TiO₂/C

Fotoelektrodegradasi menggunakan *Power Supply* (12 V, 500 mA) dan lampu UV 6 Watt ($\lambda = 254$ nm)

Material 1 = grafit/TiO₂/Cu ; berat 0,056 g (grafit+TiO₂+Cu) dari 0,053 g (grafit+TiO₂) dari 0,050 g (grafit)

Material 2 = grafit/TiO₂/Cu ; berat 0,048 g (grafit+TiO₂+Cu) dari 0,046 g (grafit+TiO₂) dari 0,043 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y1)	Absorbansi (y2)	konsentrasi 1	konsentrasi 2	Kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,5373333	0,5373333	20,25659353	20,2565935	20,256594	0
20	0,355	0,3556667	13,69784173	13,7218237	13,709833	0,016957845
40	0,3043333	0,328	11,87529856	12,7266187	12,300959	0,601974247
60	0,2853333	0,3003333	11,19184532	11,7314137	11,461629	0,381532436
80	0,2646667	0,2903	10,44844245	11,3705036	10,909473	0,651995693
100	0,2513333	0,2843333	9,968823741	11,1558741	10,562349	0,839371359
120	0,2463333	0,2783333	9,788967626	10,9400468	10,364507	0,813935863
140	0,2303333	0,267	9,213428058	10,5323741	9,8729011	0,932635691
160	0,2166667	0,2546667	8,721823741	10,0887302	9,405277	0,966548838
180	0,2183333	0,241	8,781773381	9,5971223	9,1894478	0,576538751
200	0,22	0,2293333	8,841726619	9,17745683	9,0095917	0,237397112
220	0,219	0,2203333	8,805755396	8,85371583	8,8297356	0,033913146
240	0,2186667	0,22	8,793766187	8,84172662	8,8177464	0,033913146

Keterangan : Slope (b) = 0,0278

Intercept (a) = 0,0258

Persamaan Regresi Linier : $y = 0,0278x - 0,0258$

Tabel Lampiran 23. Data Fotoelektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

Fotoelektrodegradasi menggunakan *Power Supply* (12 V, 500 mA) dan lampu UV 6 Watt ($\lambda = 254 \text{ nm}$)

Material 1 = grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$; berat 0,062 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$) dari 0,060 g (grafit)

Material 2 = grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$; berat 0,065 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$) dari 0,062 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y 2)	slope	intercept	konsentrasi 1	konsentrasi 2	kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(b)	(a)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,555	0,555	0,0278	0,0258	20,89208633	20,8920863	20,892086	0
20	0,4613333	0,404333333	0,0278	0,0258	17,52278058	15,4724221	16,497601	1,449822409
40	0,4553333	0,392	0,0278	0,0258	17,30695324	15,028777	16,167865	1,610913881
60	0,4463333	0,380666667	0,0278	0,0258	16,98321223	14,6211031	15,802158	1,670263371
80	0,439	0,366666667	0,0278	0,0258	16,71942446	14,117506	15,418465	1,839834191
100	0,4266667	0,352333333	0,0278	0,0258	16,27578058	13,6019185	14,93885	1,89070603
120	0,4053333	0,322666667	0,0278	0,0258	15,50839209	12,5347722	14,021582	2,102666799
140	0,3936667	0,300333333	0,0278	0,0258	15,08873022	11,7314149	13,410073	2,373980449
160	0,383	0,297	0,0278	0,0258	14,70503597	11,6115108	13,158273	2,187452632
180	0,3756667	0,264333333	0,0278	0,0258	14,4412482	10,4364508	12,43885	2,831819372
200	0,3556667	0,26	0,0278	0,0258	13,72182374	10,2805755	12,0012	2,433329939
220	0,3373333	0,236666667	0,0278	0,0258	13,06234892	9,441247	11,251798	2,560505722
240	0,2783333	0,231666667	0,0278	0,0258	10,94004676	9,26139089	10,100719	1,186988953

Keterangan : Slope (b) = 0,0278

Intercept (a) = 0,0258

Persamaan Regresi Linier : $y = 0,0278x - 0,0258$

Tabel Lampiran 24. Data Fotoelektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{Cu}$

Fotoelektrodegradasi menggunakan *Power Supply* (12 V, 500 mA dan lampu UV 6 Watt ($\lambda = 254 \text{ nm}$))

Material 1 = berat 0,057 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-Cu}$); dari 0,055 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$); dari 0,052 g (grafit)

Material 2 = berat 0,050 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-Cu}$); dari 0,048 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$); dari 0,045 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y 2)	slope	intercept	konsentrasi 1	konsentrasi 2	kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(b)	(a)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,539333333	0,539333333	0,0261	0,0078	20,365262	20,365262	20,365262	0
20	0,403333333	0,416	0,0261	0,0078	15,15453384	15,639847	15,39719	0,343168042
40	0,364666667	0,365666667	0,0261	0,0078	13,67305236	13,711367	13,692209	0,027092214
60	0,331333333	0,35	0,0261	0,0078	12,39591315	13,111111	12,753512	0,505721325
80	0,346	0,334333333	0,0261	0,0078	12,95785441	12,510856	12,734355	0,316075828
100	0,325666667	0,317666667	0,0261	0,0078	12,17879949	11,872286	12,025543	0,216737711
120	0,306666667	0,303	0,0261	0,0078	11,45083014	11,310345	11,380587	0,099338117
140	0,288	0,295	0,0261	0,0078	10,73563218	11,003831	10,869732	0,189645497
160	0,287	0,286666667	0,0261	0,0078	10,69731801	10,684547	10,690932	0,009030738
180	0,274666667	0,281666667	0,0261	0,0078	10,2247765	10,492976	10,358876	0,189645497
200	0,264666667	0,270333333	0,0261	0,0078	9,841634738	10,058748	9,9501916	0,153522545
220	0,257	0,271333333	0,0261	0,0078	9,54789272	10,097063	9,8224777	0,388321732
240	0,256333333	0,266	0,0261	0,0078	9,522349936	9,892720	9,7075351	0,2618914

Keterangan : Slope (b) = 0,0261

Intercept (a) = 0,078

Persamaan Regresi Linier : $y = 0,0261x + 0,078$

Lampiran 13
**Data Penurunan Absorbansi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Material Semikonduktor Grafit/TiO₂,
 Grafit/TiO₂/Cu, Grafit/komposit TiO₂-SiO₂, Grafit/ komposit TiO₂-SiO₂/Cu dengan Arus dan Sinar Matahari (SM)**

Tabel Lampiran 25. Data Fotoelektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/TiO₂

Fotoelektrodegradasi menggunakan *Power Supply* (12 V, 500 mA dan sinar matahari)

Material 1 = grafit/TiO₂ ; berat 0,048 g (grafit+TiO₂) dari 0,046 g (grafit) Material 2 = grafit/TiO₂ ; berat 0,050 g (grafit+TiO₂) dari 0,049 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y 2)	konsentrasi 1	konsentrasi 2	kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,557666667	0,539333333	21,067688	20,365262	20,716475	0,496690587
20	0,500666667	0,484	18,88378033	18,245211	18,564496	0,451536897
40	0,470333333	0,462	17,72158365	17,402299	17,561941	0,225768449
60	0,449	0,446666667	16,90421456	16,814815	16,859515	0,063215166
80	0,445666667	0,430333333	16,77650064	16,189017	16,482759	0,415413946
100	0,439	0,424333333	16,5210728	15,959132	16,240102	0,39735247
120	0,417	0,412666667	15,67816092	15,512133	15,595147	0,117399593
140	0,408666667	0,399666667	15,35887612	15,014049	15,186462	0,243829925
160	0,402666667	0,399333333	15,12899106	15,001277	15,065134	0,090307379
180	0,392666667	0,388333333	14,7458493	14,579821	14,662835	0,117399593
200	0,376666667	0,372	14,13282248	13,954023	14,043423	0,126430331
220	0,377333333	0,367	14,15836526	13,762452	13,960409	0,279952876
240	0,339	0,356666667	12,68965517	13,366539	13,028097	0,478629111

Keterangan : Slope (b) = 0,0261 Persamaan Regresi Linier : $y = 0,0261x + 0,078$
 Intercept (a) = 0,078

Tabel Lampiran 26. Data Fotoelektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/TiO₂/Cu

Fotoelektrodegradasi menggunakan *Power Supply* (12 V, 500 mA dan sinar matahari)

Material 1 = grafit/TiO₂/Cu ; berat 0,054 g (grafit+TiO₂+Cu) dari 0,051.g (grafit+TiO₂) dari 0,049 g (grafit)

Material 2 = grafit/TiO₂/Cu ; berat 0,051 g (grafit+TiO₂+Cu) dari 0,049 g (grafit+TiO₂) dari 0,048 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y2)	konsentrasi 1	konsentrasi 2	kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,551	0,557666667	20,812261	21,067688	20,939974	0,180614759
20	0,4303333	0,517333333	16,18901533	19,522350	17,855683	2,357023507
40	0,3946667	0,433333333	14,82247893	16,303959	15,563219	1,047564699
60	0,386667	0,394	14,51597701	14,796935	14,656456	0,198667204
80	0,3693333	0,384	13,85185057	14,413793	14,132822	0,397353373
100	0,3453333	0,351	12,93231034	13,149425	13,040868	0,153523448
120	0,3406667	0,328	12,75351341	12,268199	12,510856	0,343168945
140	0,3286667	0,307	12,2937433	11,463602	11,878672	0,58699887
160	0,317	0,286	11,8467433	10,659004	11,252874	0,839858629
180	0,2976667	0,267666667	11,10600383	9,956577	10,531291	0,812767318
200	0,286	0,257	10,65900383	9,547893	10,103448	0,785674201
220	0,2703333	0,251	10,05874713	9,318008	9,6883774	0,523781898
240	0,2556667	0,239	9,496808429	8,858238	9,177523	0,4515378

Keterangan : Slope (b) = 0,0261

Intercept (a) = 0,078

Persamaan Regresi Linier : $y = 0,0261x + 0,078$

Tabel Lampiran 27. Data Fotoelektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/komposit TiO₂-SiO₂

Fotoelektrodegradasi menggunakan *Power Supply* (12 V, 500 mA dan sinar matahari)

Material 1 = grafit/komposit TiO₂-SiO₂; berat 0,052 g (grafit+komposit TiO₂-SiO₂) dari 0,049 g (grafit)

Material 2 = grafit/komposit TiO₂-SiO₂; berat 0,051 g (grafit+komposit TiO₂-SiO₂) dari 0,048 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y1)	Absorbansi (y2)	Konsentrasi 1	konsentrasi 2	Kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,557666667	0,557666667	21,067688	21,067688	21,067688	0
20	0,392666667	0,538	14,7458493	20,314176	17,530013	3,937401745
40	0,349	0,546	13,07279693	20,620690	16,846743	5,337166126
60	0,314	0,427	11,73180077	16,061303	13,896552	3,061420164
80	0,295666667	0,383	11,0293742	14,375479	12,702427	2,366053342
100	0,276333333	0,347	10,28863346	12,996169	11,642401	1,914516445
120	0,263666667	0,326666667	9,803320562	12,217114	11,010217	1,706809472
140	0,242	0,304333333	8,973180077	11,361430	10,167305	1,688747996
160	0,232666667	0,290666667	8,615581098	10,837803	9,7266922	1,571348403
180	0,223	0,287333333	8,245210728	10,710089	9,4776501	1,742932424
200	0,218	0,256	8,053639847	9,509579	8,7816092	1,029504126
220	0,239333333	0,285	8,87100894	10,620690	9,7458493	1,237211099
240	0,24	0,284666667	8,896551724	10,607918	9,752235	1,210118885

Keterangan : Slope (b) = 0,0261

Intercept (a) = 0,078

Persamaan Regresi Linier : $y = 0,0261x + 0,078$

Tabel Lampiran 28. Data Fotoelektrodegradasi Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Grafit/ komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{Cu}$

Fotoelektrodegradasi menggunakan *Power Supply* (12 V, 500 mA dan sinar matahari)

Material 1 = berat 0,054 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{+Cu}$); dari 0,051 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$);dari 0,047 g (grafit)

Material 2 = berat 0,059 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{+Cu}$); dari 0,055 g (grafit+komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$);dari 0,052 g (grafit)

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y 2)	konsentrasi 1	konsentrasi 2	kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,557666667	0,557666667	21,067688	21,067688	21,067688	0
20	0,389666667	0,482	14,63090677	18,168582	16,399745	2,501514411
40	0,354333333	0,437666667	13,27713921	16,469987	14,873563	2,257684487
60	0,329	0,395	12,30651341	14,835249	13,570881	1,788086113
80	0,314666667	0,365333333	11,75734355	13,698595	12,727969	1,372672168
100	0,287333333	0,350666667	10,7100894	13,136654	11,923372	1,71584021
120	0,269666667	0,329333333	10,03320562	12,319285	11,176245	1,616502092
140	0,286666667	0,316666667	10,68454662	11,833972	11,259259	0,812766415
160	0,278	0,31	10,35249042	11,578544	10,965517	0,866950843
180	0,258	0,302	9,586206897	11,272031	10,429119	1,192057409
200	0,237333333	0,284	8,794380587	10,582375	9,688378	1,264303312
220	0,300333333	0,261666667	11,20817369	9,726692	10,467433	1,047565602
240	0,228333333	0,25	8,449553001	9,279693	8,8646232	0,586997967

Keterangan : Slope (b) = 0,0261

Intercept (a) = 0,078

Persamaan Regresi Linier : $y = 0,0261x + 0,078$

Lampiran 14
Data Penurunan Absorbansi Zat Warna *Remazol Yellow FG* karena Pemberian Snar UV (Fotolisis)

Tabel Lampiran 29. Data Fotolisis Zat Warna *Remazol Yellow FG* Menggunakan Sinar UV

Zat Warna = *Remazol Yellow FG* 20 ppm ; Volume = 15 ml

waktu (menit)	Absorbansi (y 1)	Absorbansi (y 2)	konsentrasi 1	konsentrasi 2	kons rata2	SD
t	(A rata2)	(A rata2)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
0	0,545333333	0,545333333	20,11887255	20,11887255	20,11887255	0
20	0,542333333	0,541333333	20,00857843	19,97181373	19,99019608	0,025996573
40	0,538	0,541333333	19,84926471	19,97181373	19,91053922	0,086655243
60	0,532666667	0,540666667	19,65318627	19,94730392	19,8002451	0,207972583
80	0,539333333	0,539	19,89828431	19,88602941	19,89215686	0,008665524
100	0,538333333	0,537666667	19,86151961	19,8370098	19,84926471	0,017331049
120	0,535666667	0,535333333	19,76348039	19,75122549	19,75735294	0,008665524

Keterangan : Slope (b) = 0,0272
Intercept (a) = 0,0019
Persamaan Regresi Linier : $y = 0,0272x - 0,0019$

Lampiran 15
Pengukuran Intensitas Sinar Matahari

Tabel Lampiran 30. Pengukuran Intensitas Sinar Matahari

Waktu pengukuran	Intensitas (x 10 ² Lux)	Intensitas Rata-rata (x 10 ² Lux)	Standar Deviasi
9.30 WIB	570	573,4	8,988882
	584		
	560		
	577		
	576		
11.00 WIB	731	732	7,516648
	736		
	720		
	733		
	740		
13.00 WIB	639	639	1,732051
	640		
	640		
	636		
	640		

Lampiran 16
Efisiensi Penurunan Konsentrasi pada 60 menit Pertama Degradasi (h) dan
Perhitungan Efisiensi Relatif pada 60 menit Pertama Degradasi (h_{60})

Tabel Lampiran 31. Efisiensi Penurunan Konsentrasi pada 60 menit Pertama Degradasi (η) dan Perhitungan Efisiensi Relatif (η_{60})

Material	Perlakuan	Kons. Awal	Kons. Akhir	Efisiensi Penurunan Konsentrasi (%)	Efisiensi Penurunan Konsentrasi Rata2 (%)	SD (standar deviasi)
Grafit/TiO ₂	Adsorpsi	20,340529	19,489209	4,185	4,450608	0,375145
		20,340529	19,381295	4,716		
	Arus + UV	20,580336	16,107914	21,732	11,90833	13,89211
		20,825032	20,390805	2,085		
	Arus	20,58034	15,18464	26,218	22,45949	5,314937
		20,965517	17,0447	18,701		
	Arus + matahari	21,67688	16,904215	22,017	19,72557	3,241001
		20,365262	16,814815	17,434		
	fotodegradasi	19,530952	18,411905	5,730	5,760088	0,0431
		19,530952	18,4	5,791		
Grafit/TiO ₂ /Cu	Adsorpsi	20,340529	18,889687	7,133	6,543278	0,83366
		20,340529	19,129496	5,954		
	Arus + UV	20,256594	11,191845	44,750	43,41778	1,883498
		20,256594	11,731414	42,086		
	Arus	20,256594	11,755396	41,968	38,416	5,02266
		20,256594	13,194245	34,864		
	Arus + matahari	21,067688	14,515977	31,098	30,00059	1,552514
		20,812261	14,796935	28,903		
	fotodegradasi	19,411905	17,519048	9,751	9,781675	0,043364
		19,411905	17,507143	9,812		
Grafit/TiO ₂ -SiO ₂	Adsorpsi	20,965517	19,356322	7,675	7,002031	0,952341
		21,509953	20,148669	6,329		
	Arus + UV	21,059953	16,983212	19,358	24,94806	7,905843
		20,892086	14,51199	30,538		
	Arus	20,365262	17,354917	14,782	22,0698	10,30684
		20,892086	14,758621	29,358		
	Arus + matahari	21,067688	11,731801	44,314	34,03855	14,53135
		21,067688	16,061303	23,763		
	fotodegradasi	20,449755	18,917892	7,491	7,400971	0,127124
		20,449755	18,954657	7,311		
Grafit/TiO ₂ -SiO ₂ /Cu	Adsorpsi	20,688248	17,798561	13,968	11,24379	3,852286
		20,688248	18,925647	8,520		
	Arus + UV	20,365262	12,395913	39,132	37,37615	2,483255
		20,365262	13,111111	35,620		

	Arus	20,365262	13,829737	32,092	31,40337	0,973214
		19,752996	13,685824	30,715		
	Arus + matahari	21,067688	12,306513	41,586	35,58438	8,487339
		21,067688	14,835249	29,583		
	fotodegradasi	20,449755	17,900735	12,465	12,31498	0,211874
		20,449755	17,96201	12,165		
Grafit kosong	absorpsi	20,820144	20,328536	2,361	2,102057	0,366503
		20,820144	20,43645	1,843		
	arus	20,820144	17,019183	18,256	16,874	1,954684
		20,820144	17,594723	15,492		

Keterangan :

Arus : Elektrodegradasi

Arus + UV : Fototelektrodegradasi dengan sinar UV

Arus + Sinar matahari : Fotoelektrodegradasi dengan sinar matahari

Efisiensi Relatif (η_{60}) pada Fotoelektrodegradasi Dibandingkan dengan Elektrodegradasi dan Fotodegradasi

3. Efisiensi relatif fotoelektrodegradasi dibandingkan dengan elektrodegradasi

$$\text{Efisiensi relatif } (\eta_{60}) = \frac{43,41 - 30,00}{43,41} \times 100\% = 30,90\%$$

4. Efisiensi relatif fotoelektrodegradasi dibandingkan dengan fotodegradasi

$$\text{Efisiensi relatif } (\eta_{60}) = \frac{43,41 - 9,78}{43,41} \times 100\% = 77,47\%$$

Efisiensi Relatif (η_{60}) Fotoelektrodegradasi Grafit/TiO₂/Cu Dibandingkan Grafit/TiO₂ dan Grafit/TiO₂-SiO₂/Cu Dibandingkan Grafit/TiO₂-SiO₂

1. Efisiensi relatif fotoelektrodegradasi grafit/TiO₂/Cu dibandingkan dengan grafit/TiO₂

$$\text{Efisiensi relatif } (\eta_{60}) = \frac{43,41 - 11,90}{43,41} \times 100\% = 72,57\%$$

2. Efisiensi relatif fotoelektrodegradasi grafit/TiO₂-SiO₂/Cu dibandingkan dengan grafit/TiO₂-SiO₂

$$\text{Efisiensi relatif } (\eta_{60}) = \frac{37,37 - 24,94}{37,37} \times 100\% = 33,25\%$$

Efisiensi Relatif (η_{60}) Fotoelektrodegradasi Grafit/TiO₂/Cu Dibandingkan Grafit/TiO₂-SiO₂/Cu

$$\text{Efisiensi relatif } (\eta_{60}) = \frac{43,41 - 37,37}{43,41} \times 100\% = 13,91\%$$

Lampiran 17
Uji Statistik Anova

Tabel Lampiran 32. Data Persen Penurunan Konsentrasi Zat Warna *RemazolYellow FG* pada 60 menit pertama fotoelektrodegradasi

Material Semikonduktor	Persen penurunan konsentrasi (60 Menit)
TiO ₂ /Cu (UV)	44,75
TiO ₂ /Cu (UV)	38
TiO ₂ -SiO ₂ /Cu (UV)	39,13
TiO ₂ -SiO ₂ /Cu (UV)	35,62

Descriptives

Efisiensi

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
fotoelektrodegradasi UV TiO ₂ /Cu	2	43,4180	1,88373	1,33200	26,4933	60,3427	42,09	44,75
fotoelektrodegradasi UV TiO ₂ -SiO ₂ /Cu	2	37,3760	2,48336	1,75600	15,0639	59,6881	35,62	39,13
Total	4	40,3970	3,92519	1,96259	34,1512	46,6428	35,62	44,75

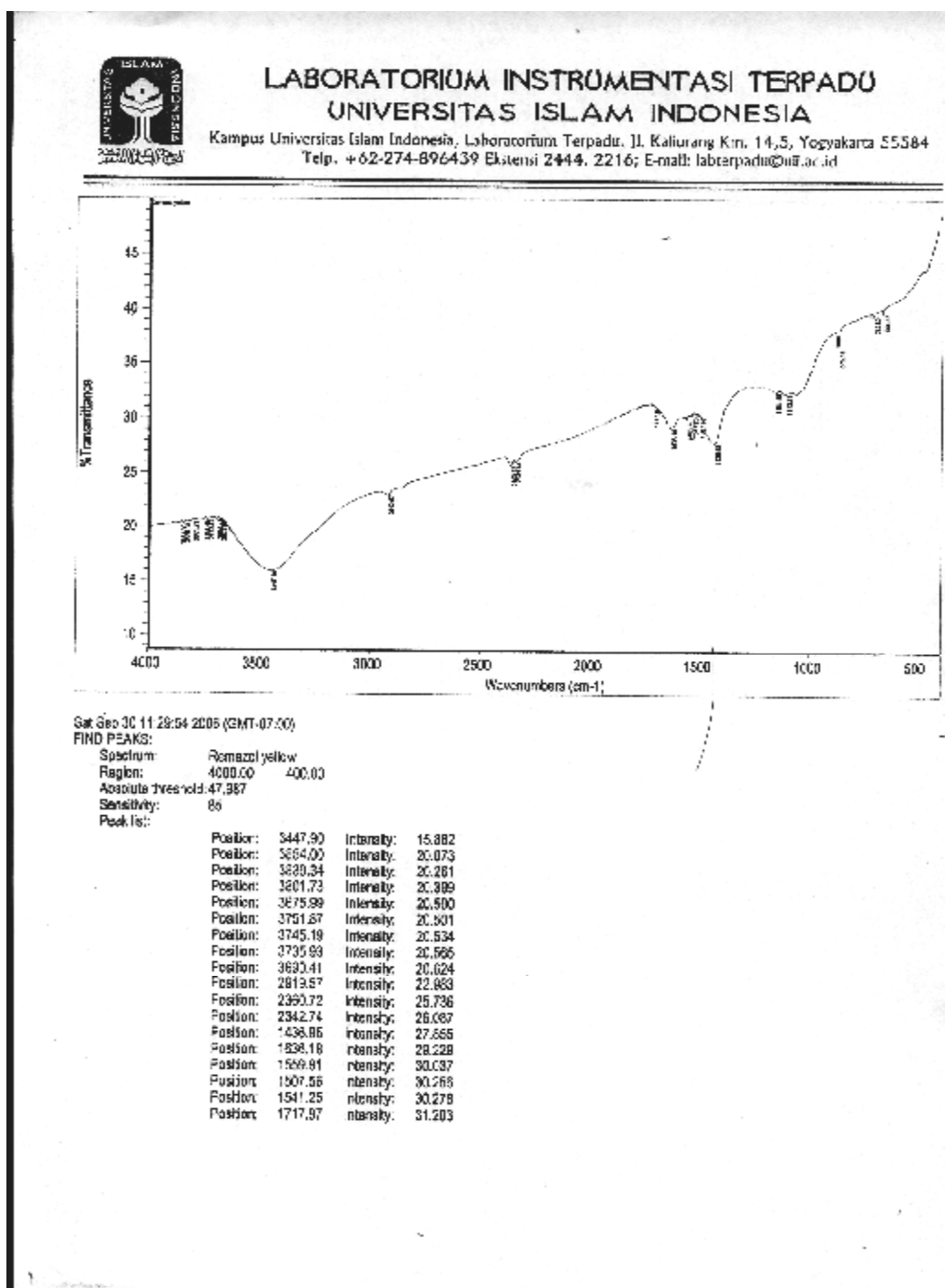
ANOVA

Efisiensi

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	36,506	1	36,506	7,515	,111
Within Groups	9,716	2	4,858		
Total	46,221	3			

Lampiran 18 SPEKTRA FT- IR

1. Sampel zat warna *Remazol Yellow FG* sebelum degradasi

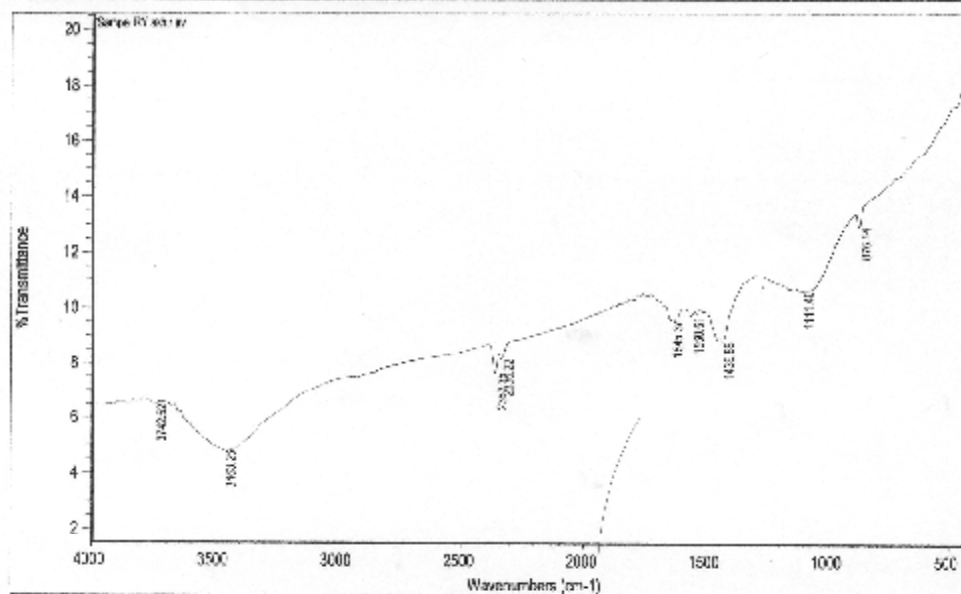


2. Sampel zat warna *Remazol Yellow FG* setelah degradasi



LABORATORIUM INSTRUMENTASI TERPADU
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Kampus Universitas Islam Indonesia, Laboratorium Terpadu, Jl. Kaliurang Km. 14,5, Yogyakarta 55584
Telp. + 62-274-896439 Ekstensi 2444, 2216; E-mail: labterpadu@uii.ac.id



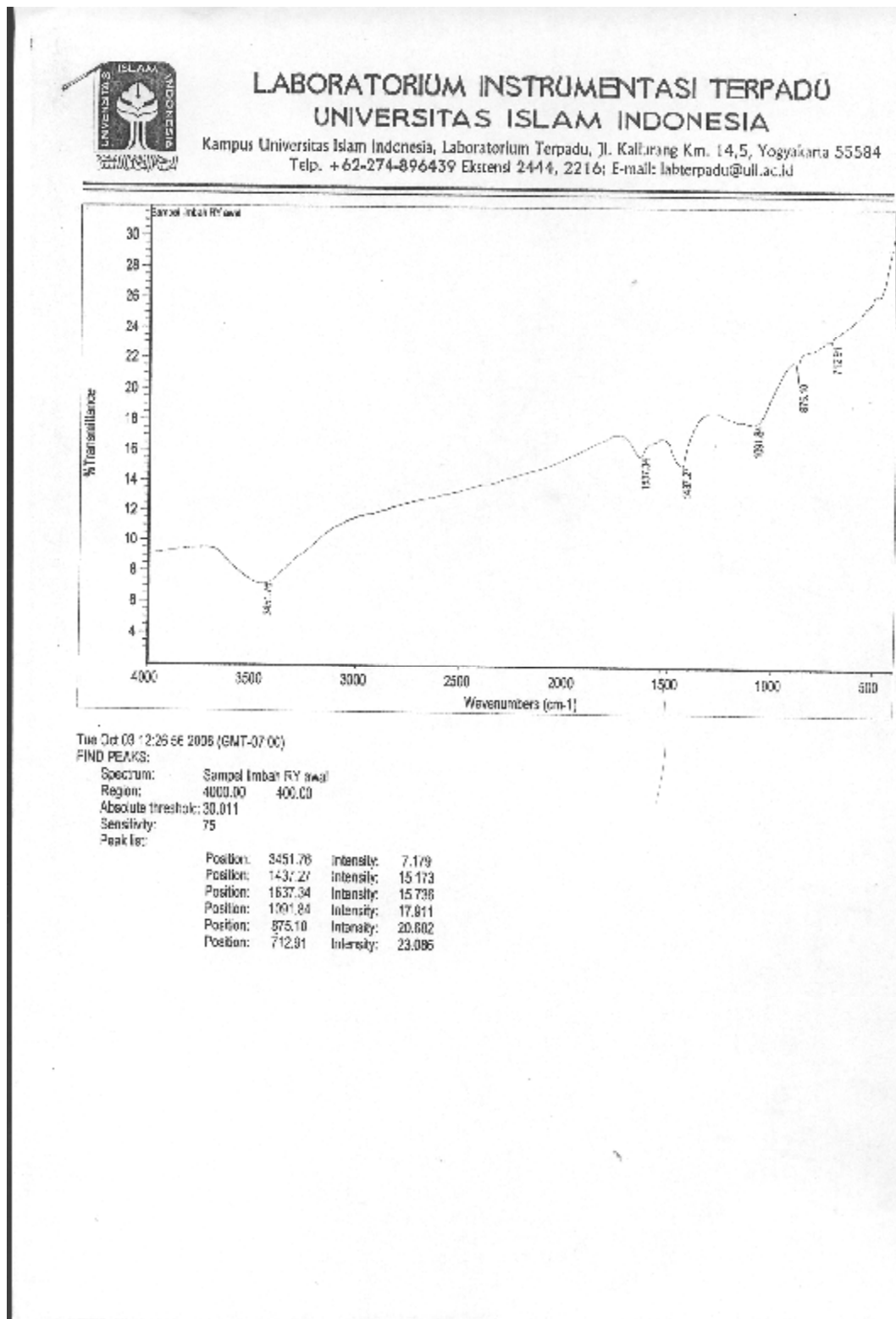
Tue Oct 03 14:28:43 2006 (GMT-07:00)

FIND PEAKS:

Spectrum: *Sample RY akhir uv
Region: 4000.00 400.00
Absolute threshold: 19.991
Sensitivity: 75

Peak list:	Position:	Intensity:
	3483.28	4.817
	3362.35	6.458
	2936.22	7.845
	1645.37	8.156
	1560.51	8.798
	1111.40	9.587
	878.14	10.942

3. Sampel limbah zat warna *Remazol Yellow FG* sebelum degradasi

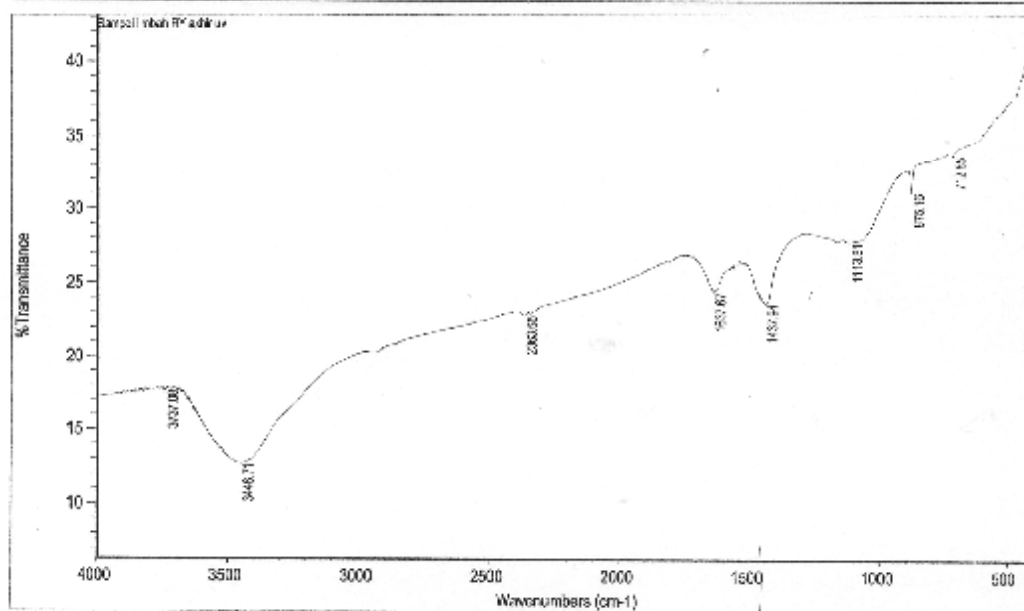


4. Sampel limbah zat warna *Remazol Yellow FG* setelah degradasi



LABORATORIUM INSTRUMENTASI TERPADU
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Kampus Universitas Islam Indonesia, Laboratorium Terpadu, Jl. Kaliurang Km. 14,5, Yogyakarta 55584
Telp. +62-274-896439 Ekstensi 2444, 2216; E-mail: labterpadu@uii.ac.id



Tue Oct 03 12:32:04 2006 (GMT-07:00)

FIND PEAKS:

Spectrum: Sampel limbah RY akhir uv
Region: 4000.00 400.00
Absolute threshold: 38.069
Sensitivity: 75

Peak list:

Position	Intensity
3448.71	12.667
3337.08	17.592
2363.85	22.759
1637.84	23.623
1437.87	24.352
1113.81	27.724
875.16	31.015
712.85	33.578

Lampiran 19
Pola Difraksi Sinar X Grafit/Komposit TiO₂/Cu *Recycle*

*** Basic Data Process ***

Group Name : standard
 Data Name : Fitria_R_UN
 File Name : Fitria_R_UN.PKR
 Sample Name : TiO₂ Cu
 Comment : 0.058

# Strongest 3 peaks							
no.	peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I ₁	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	21	36.4352	2.46396	100	0.46870	448	4643
2	12	27.4901	3.24198	80	0.74030	360	5426
3	11	26.4904	3.36201	61	0.61920	272	3778

# Peak Data List							
peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I ₁	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)	
1	14.7611	5.99647	3	0.30000	15	95	
2	15.6053	5.67393	11	0.36440	50	350	
3	16.2884	5.43748	36	0.41270	161	1386	
4	17.5312	5.05471	5	0.31250	22	162	
5	18.2443	4.85872	4	0.26860	16	87	
6	18.8854	4.69520	4	0.25420	20	172	
7	21.4694	4.13558	3	0.13890	15	67	
8	22.9281	3.87566	9	0.54380	40	488	
9	23.9000	3.72021	22	0.82220	97	1394	
10	24.8465	3.58060	25	0.88690	113	2181	
11	26.4904	3.36201	61	0.61920	272	3778	
12	27.4901	3.24198	80	0.74030	360	5426	
13	28.5500	3.12398	8	0.40000	34	483	
14	29.2000	3.05590	7	0.42000	31	259	
15	29.6000	3.01551	7	0.23340	31	197	
16	31.0000	2.88245	6	0.26660	26	312	
17	31.5500	2.83344	6	0.00000	27	0	
18	32.5491	2.74871	40	0.80790	178	3073	
19	33.4500	2.67671	6	0.28000	26	222	
20	35.7000	2.51300	21	0.35340	94	1227	
21	36.4352	2.46396	100	0.46870	448	4643	
22	37.3166	2.40776	9	0.30830	40	295	
23	38.1744	2.35561	6	0.34120	26	176	
24	38.8000	2.31906	4	0.20000	17	205	
25	39.1500	2.29913	6	0.00000	26	0	
26	39.7982	2.26316	32	0.63220	144	2118	
27	41.4000	2.17922	20	0.75000	90	1136	
28	41.7000	2.16423	8	0.41120	35	248	
29	42.4071	2.12977	39	0.42960	175	1947	
30	43.1500	2.09481	13	0.00000	57	0	
31	44.0000	2.05629	23	0.85000	103	1911	
32	44.7500	2.02355	21	0.70000	93	1102	
33	45.3000	2.00026	9	0.60000	42	437	
34	45.8500	1.97753	7	0.25460	33	200	
35	47.1488	1.92604	5	0.23100	21	140	
36	48.0750	1.89107	6	0.18340	29	130	
37	48.6437	1.87029	5	0.21250	22	95	
38	48.9791	1.85826	6	0.40830	28	230	
39	50.1000	1.81928	9	0.30000	39	308	
40	50.6500	1.80081	7	0.35000	32	317	
41	52.6604	1.73669	7	0.52920	33	345	
42	53.4500	1.71289	11	0.44000	48	585	
43	53.7500	1.70403	14	0.00000	63	0	

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
44	54.4361	1.68416	38	0.87220	171	3113
45	56.6033	1.62472	14	0.67330	64	827
46	57.6884	1.59671	6	0.47690	28	300
47	59.3535	1.55583	4	0.16430	16	87
48	59.9298	1.54224	6	0.22620	26	120
49	60.3763	1.53190	5	0.26390	22	119
50	61.4733	1.50716	26	0.40330	117	1049
51	62.0900	1.49367	4	0.22000	19	134
52	62.8944	1.47648	8	0.58890	36	378
53	63.6000	1.46179	4	0.30000	16	114
54	64.1791	1.44999	7	0.36670	30	250
55	65.5385	1.42317	4	0.16580	20	85
56	66.4866	1.40516	3	0.20670	14	82
57	67.9550	1.37832	6	0.27000	27	198
58	69.0784	1.35863	18	0.91810	82	1389
59	69.6000	1.34971	8	0.00000	38	0
60	70.0500	1.34214	7	0.67500	31	460
61	70.5000	1.33467	4	0.26660	16	110
62	73.5500	1.28668	17	0.35000	74	570
63	74.0000	1.27996	8	0.37500	37	405
64	74.5625	1.27169	5	0.22500	23	126
65	75.1375	1.26338	4	0.22500	20	108
66	76.0150	1.25097	4	0.37000	18	143
67	76.7000	1.24149	5	0.40000	21	213
68	77.0000	1.23740	5	0.00000	22	0
69	77.5539	1.22994	37	0.36790	166	1348
70	78.2589	1.22062	6	0.46790	25	272
71	79.2000	1.20846	3	0.30000	14	126
72	79.6417	1.20286	3	0.25000	15	85

*** Basic Data Process ***

Data Information

Group Name	: standard
Data Name	: Fitria_R_UN\$
File Name	: Fitria_R_UN\$.PKR
Sample Name	: TiO2_Cu
Comment	: 0.058
Date & Time	: 10-02-06 15:06:03

Measurement Condition

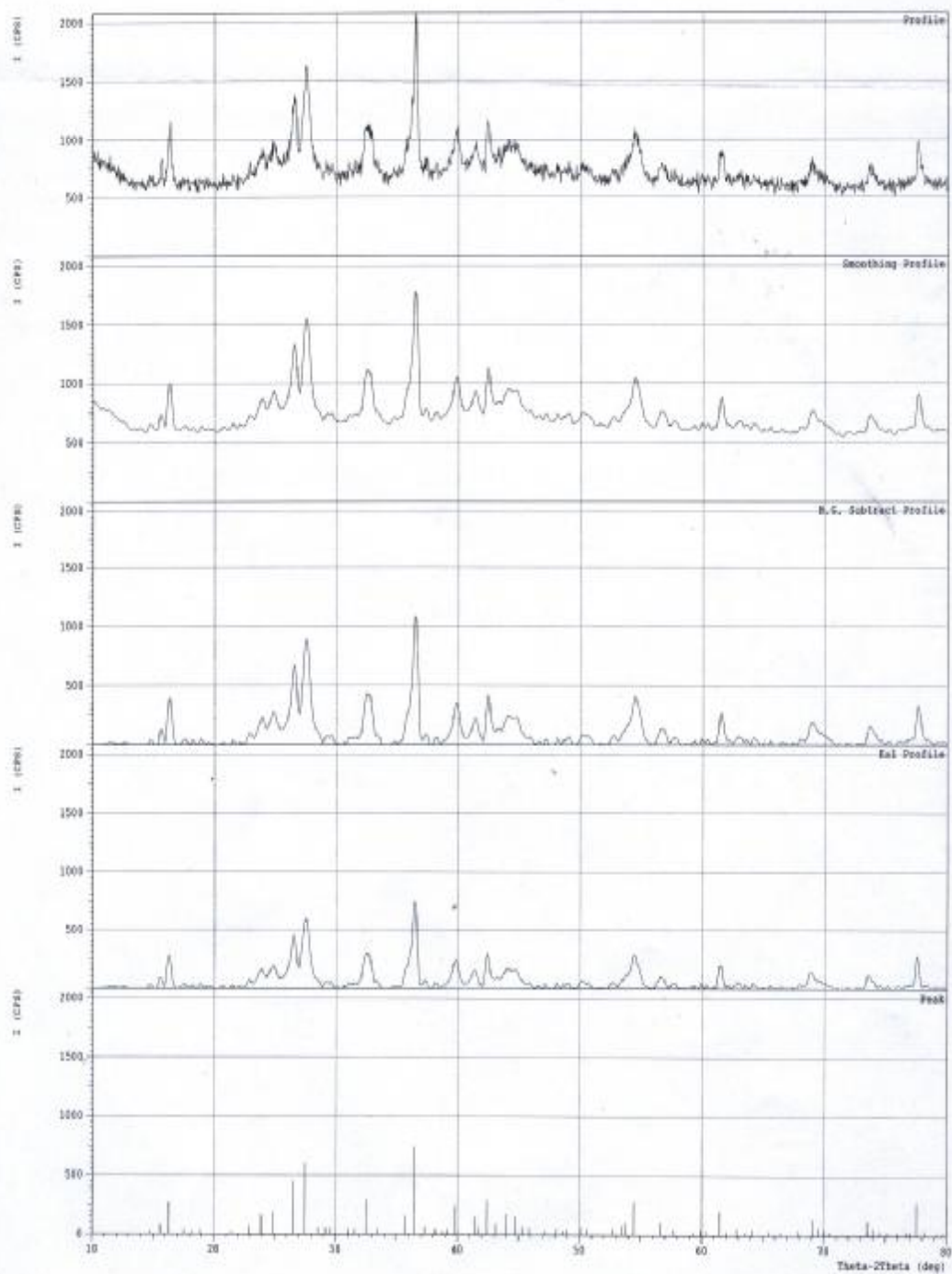
X-ray tube	
target	: Cu
voltage	: 40.0 (kV)
current	: 30.0 (mA)
Slits	
divergence slit	: 1.00 (deg)
scatter slit	: 1.00 (deg)
receiving slit	: 0.30 (mm)
Scanning	
drive axis	: Theta-2Theta
scan range	: 10.0000 - 80.0000 (deg)
scan mode	: Continuous Scan
scan speed	: 5.0000 (deg/min)
sampling pitch	: 0.0500 (deg)
preset time	: 0.60 (sec)

Data Process Condition

Smoothing	[AUTO]
smoothing points	: 13
B.G.Subtraction	[AUTO]
sampling points	: 19
repeat times	: 30
Ka1-a2 Separate	[MANUAL]
Ka1 a2 ratio	: 50 (%)
Peak Search	[AUTO]
differential points	: 11
FWHM threshold	: 0.050 (deg)
intensity threshold	: 30 (par mil)
FWHM ratio (n-1)/n	: 2
System error Correction	[NO]
Precise peak Correction	[NO]

*** Basic Data Process ***

Group Name : standard
Data Name : Fitria R UNS
File Name : Fitria_R_UN.S.PKR
Sample Name : TiO₂ Cu
Comment : 0.058



Lampiran 20
Pola Difraksi Sinar X Grafit/Komposit TiO₂-SiO₂/Cu *Recycle*

*** Basic Data Process ***

Group Name : standard
 Data Name : Fitria_R_UN5_1
 File Name : Fitria_R_UN5_1.PKR
 Sample Name : TiO₂_SiO₂_Cu
 Comment :

# Strongest 3 peaks							
no.	peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I ₁	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	18	26.5840	3.35039	100	0.17070	1052	3426
2	17	26.3000	3.38592	42	0.50600	440	3545
3	20	27.3729	3.25559	23	0.21720	239	1088

# Peak Data List							
peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I ₁	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)	
1	15.4540	5.72913	5	0.16410	52	214	
2	15.8000	5.60444	4	0.21900	43	165	
3	16.0600	5.51429	7	0.36000	78	588	
4	17.5473	5.05011	4	0.22110	37	352	
5	21.5871	4.11330	4	0.12570	39	109	
6	21.8435	4.06559	5	0.16120	53	250	
7	22.8278	3.89247	3	0.12850	32	126	
8	23.4500	3.79058	5	0.20000	57	530	
9	23.6500	3.75897	10	0.00000	100	0	
10	23.9434	3.71357	20	0.18530	211	1252	
11	24.6940	3.60236	7	0.14190	77	355	
12	25.1235	3.54174	5	0.14330	51	173	
13	25.3000	3.51744	4	0.07420	46	85	
14	25.5000	3.49030	7	0.00000	69	0	
15	25.7500	3.45698	12	0.34000	122	1066	
16	25.9500	3.43078	18	0.00000	188	0	
17	26.3000	3.38592	42	0.50600	440	3545	
18	26.5840	3.35039	100	0.17070	1052	3426	
19	26.9175	3.30963	4	0.21500	40	233	
20	27.3729	3.25559	23	0.21720	239	1088	
21	27.8870	3.19673	4	0.08310	40	107	
22	31.7154	2.81904	4	0.14840	39	355	
23	32.0000	2.79461	4	0.00000	40	0	
24	32.2500	2.77352	6	0.00000	64	0	
25	32.5000	2.75275	7	0.29160	71	589	
26	33.1425	2.70084	3	0.27270	33	320	
27	34.6557	2.58630	3	0.18850	32	275	
28	35.4855	2.52770	3	0.10610	34	129	
29	36.0768	2.48761	9	0.36300	94	587	
30	36.4000	2.46626	4	0.12260	47	191	
31	39.1661	2.29822	3	0.12160	35	130	
32	39.3500	2.28790	4	0.12220	38	243	
33	39.6000	2.27403	5	0.00000	50	0	
34	39.7500	2.26579	6	0.35000	58	342	
35	40.1104	2.24626	3	0.21250	32	204	
36	41.1507	2.19185	5	0.18790	55	284	
37	42.0500	2.14703	4	0.13340	38	168	
38	42.3500	2.13251	6	0.50000	63	533	
39	42.8000	2.11112	3	0.19240	36	143	
40	43.1293	2.09576	5	0.25030	56	290	
41	43.5000	2.07876	5	0.28760	55	265	
42	43.7000	2.06971	4	0.10000	41	99	
43	43.9000	2.06074	4	0.17140	42	90	

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I ₁	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
44	44.0500	2.05407	7	0.21000	74	352
45	44.2500	2.04525	5	0.00000	54	0
46	44.5027	2.03422	8	0.19070	87	403
47	44.7561	2.02329	4	0.12880	44	245
48	47.8495	1.89946	3	0.11160	34	141
49	51.5544	1.77132	4	0.12880	39	192
50	53.7180	1.70497	3	0.12060	35	114
51	54.0049	1.69659	4	0.14400	47	139
52	54.3174	1.68756	12	0.19520	127	548
53	56.6067	1.62463	5	0.12710	53	196
54	57.6034	1.59886	3	0.13480	35	156
55	60.8060	1.52209	3	0.13800	35	186
56	61.1451	1.51446	3	0.12480	33	160
57	62.6986	1.48062	4	0.17580	39	163
58	68.9111	1.36152	4	0.30810	37	305
59	69.8302	1.34583	3	0.16620	33	115
60	73.7126	1.28424	3	0.26290	32	304
61	77.4107	1.23186	10	0.32860	101	926

*** Basic Data Process ***

Data Information

Group Name : standard
Data Name : Fitria_R_UN_1
File Name : Fitria_R_UN_1.RAW
Sample Name : TiO2_SiO2_Cu
Comment :
Date & Time : 10-02-06 15:22:47

Measurement Condition

X-ray tube
target : Cu
voltage : 40.0 (kV)
current : 30.0 (mA)
Slits
divergence slit : 1.00 (deg)
scatter slit : 1.00 (deg)
receiving slit : 0.30 (mm)
Scanning
drive axis : Theta-2Theta
scan range : 10.0000 - 80.0000 (deg)
scan mode : Continuous Scan
scan speed : 5.0000 (deg/min)
sampling pitch : 0.0500 (deg)
preset time : 0.60 (sec)

Data Process Condition

Smoothing [AUTO]
smoothing points : 5
B.G.Subtraction [AUTO]
sampling points : 5
repeat times : 30
Kal-a2 Separate [MANUAL]
Kal a2 ratio : 50 (%)
Peak Search [AUTO]
differential points : 5
FWHM threshold : 0.050 (deg)
intensity threshold : 30 (par mil)
FWHM ratio (n-1)/n : 2
System error Correction [NO]
Precise peak Correction [NO]

*** Basic Data Process ***

Group Name : standard
Data Name : Fitria_R_UN_1
File Name : Fitria_R_UN_1.PKR
Sample Name : TiO2_SiO2_Cu
Comment :

